INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LA LLEGADA DE LA TELEVISION DIGITAL

GENES DE LA DISLEXIA

SINGULARIDAD DE LA GEOMETRIA JAPONESA

SEIS MESES EN LA MIR



JULIO 1998
800 PTAS.



Julio de 1998 Número 262

Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES



Portada: Recreación artística de Don Dixon

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	NASA/Agencia Espacial Rusa
8	Ian Worpole
9-15	NASA/Agencia Espacial Rusa
16-17	David Kampfner/ *Gamma Liaison*
18-23	Jennifer C. Christiansen
24-25	Bernd Auers
26-27	Bernd Auers (*arriba*), Chel Dong, fuente: Art Altman (*abajo, izquierda*) y Chel Dong, fuente: Capital Market Risk Advisors (*abajo, derecha*)
28	Reimpresión de *The Financial Post* (*arriba*), Chel Dong, fuente: Office of the Comptroller of the Currency (*abajo*)
30	Michael Durland y Mark Engel
46-47	Chris Burke; Pantalla de plasma cortesía de QFTV, INC.
48-51	Slim Films
52	Panasonic Consumer Electronics (*arriba*), Stanley (*centro*) y Fujitsu Microelectronics (*abajo*)
53	Planar (*arriba*), Doug Peck, *PixTech* (*abajo, izquierda*) y Futaba Corporation (*abajo, derecha*)
54	Edwin H. Remsberg, *Gamma Liaison*
55	Instituto de Tecnología de Massachusetts
56-59	Slim Films
61-68	Xosé R. Bustelo, Silvio Gutkind y Piero Crespo
70	Bryan Christie, sobre Toshihisa Iwasaki
72-74	Bryan Christie
76-77	Hiroshi Umeoka (*fotografías*); Bryan Christie (*dibujos*)
78-79	C. Rentz/*Bruce Coleman Inc.*
80-81	Patricia J. Wynne
82-83	John Tom Seetin
84	Bryan Christie
85	Bryan Christie (*arriba*), Dana Burns-Pizer (*abajo*)
88	Dusan Petricic
96	Steven Senne, *AP Photo* (*fotografía*), Laurie Grace (*dibujos*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Seis meses en la Mir*; Esteban Santiago: *Genética y cognición*; Luis Bou: *Un cálculo del riesgo, Geometría en los templos del Japón* y *Juegos matemáticos*; Xavier Bellés: *El canto de la cigarra*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; Carol Ezzell; W. Wayt Gibbs; Alden M. Hayashi; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; y Glenn Zorpette
Marguerite Holloway, Steve Mirsky y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.150	20.700

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

La antigüedad del hombre. «¿Fue el cejijunto hombre de Neandertal antepasado nuestro por línea directa o fue un desgraciado primo condenado a la extinción? ¿Es *Homo sapiens* un recién llegado a Europa? En agosto pasado se resolvió el misterio, en un apacible pueblo francés del departamento de la Cherente, cuando se limpiaron los fragmentos de un cráneo antiquísimo; con un cepillo se eliminó la arcilla adherida. Lo más curioso es que se trata de un cráneo de todo punto parecido al nuestro. No presenta ningún rasgo neandertaloide. Su tamaño está dentro de la gama de los cráneos de las hembras actuales: esa mujer podría haberse sentado frente al lector en el metro y éste no se hubiera asustado. Tal vez, pudiera haberle incluso sonreído. La dama de Charente sitúa al hombre sobre el continente europeo hace unos 100.000 años. —Loren Eiseley»

Atomos primordiales. «Noventa años después de que Edwin Hubble descubriera que las galaxias parecen alejarse unas de otras a unas velocidades fabulosas, el cuadro que presenta la teoría de la expansión del universo (según la cual en un principio toda la materia estaba comprimida en una masa maciza de densidad y temperatura altísimas) nos proporciona las condiciones adecuadas para reunir todos los elementos conocidos en el sistema periódico. Según los cálculos, la formación de los elementos debió de iniciarse cinco minutos después de la máxima compresión del universo. En líneas generales se completó al cabo de unos 10 minutos. —George Gamow»

...cien años

El miedo. «De las 298 clases de objetos de miedo confesados por 1707 personas, el trueno y el rayo encabezan la lista. Pero, ¿hay una razón objetiva para ese miedo? Creemos que no. Como prueba podemos citar estadísticas del Instituto de Meteorología de EE.UU. Durante los años 1890-93 los muertos por rayo se cifraron en un promedio de 196 por año. Y si nos atenemos a las estadísticas, en Nueva York el peligro de morir por la coz de un caballo es mayor en un 50 por ciento que el morir por un rayo.»

España frente a las guerrillas cubanas. «Debido a las peculiaridades de la orografía cubana, una fuerza reducida es capaz de mantener acorralada a una fuerza mucho mayor si sigue el método de la guerra de guerrillas adoptado por los insurgentes cubanos contra los soldados españoles. Los ejércitos españoles han sido acosados sin descanso por el enemigo, y como los cubanos no se enfrentan en campo abierto, han dedicado su atención a aislar las distintas partes de la isla para impedir la movilización de grandes cuerpos de tropas insurgentes; a la "reconcentración", mediante la que esperaban privar de alimentos a las fuerzas cubanas confinando en las ciudades a los campesinos que las avituallaban de comida; y a la protección de las grandes haciendas y plantaciones.»

Rueda, rueda, barquito. «En la ilustración vemos la embarcación rodante botada en Bar Harbor (Maine). No sorprenderá a nuestros lectores el enterarse de que el primer viaje acabó en desastre y que tras rodar, o más bien ser juguete del viento, durante una travesía de 15 millas los dos tripulantes se sintieron aliviados de cambiar su balanceante plataforma por la sólida cubierta de un carguero de altura. La embarcación se componía de un tonel cilíndrico de unos tres metros de diámetro, construido de duelas sujetas con aros a la manera usual en los toneles. El movimiento de rodadura lo recibía a través de un sistema manual de palancas y engranajes y se desplazaba hacia adelante merced a las paletas dispuestas en la periferia del tonel.»

Marinero con su embarcación rodante

...ciento cincuenta años

Salmón de Oregón. «El teniente Howison, de la armada estadounidense, en su informe acerca de Oregon, expone que los salmones entran por la embocadura del río Columbia en mayo y viajan 320 kilómetros aguas arriba. Los salmoncillos salen a la mar en octubre, cuando su tamaño es casi el de un arenque. Esos peces constituyen el medio de subsistencia principal de muchos miles de indios, que viven en los campos regados por el Columbia y sus afluentes y brindan un abasto generoso a los colonos blancos de Oregon.»

Viaje a Borneo. «Atravesando una multitud de perplejos yaks nos escoltaron hasta una casa situada en el centro del pueblo. Su estructura era redonda y estaba perfectamente ventilada merced a lumbreras abiertas en su tejado puntiagudo. Ascendimos a la sala superior y nos quedamos estupefactos al descubrir que nos hallábamos en la casa de las cabezas, así la llaman, y que las vigas estaban forradas de cabezas humanas, que pendían de pequeños cuerdas que atravesaban la parte superior de los cráneos. Aquellas cabezas estaban pintadas del modo más fantástico y espantoso. Sin embargo, la primera impresión ocasionada por tan insólita visión se disipó enseguida y conseguimos celebrar una excelente comida en compañía de aquellos caballeros. Frank Marryat» [*Extractado de* Borneo y el Archipiélago indio, *por Frank Marryat, Londres, 1848.*]



1. SHANNON W. LUCID a bordo de la estación espacial Mir. Su misión en la plataforma duró seis meses.

Seis meses en la Mir

Ahora que el programa Transbordador-Mir se acerca a su fin, una veterana astronauta de la NASA analiza su misión a bordo de la plataforma rusa y sugiere qué enseñanzas pueden extraerse para la Estación Espacial Internacional

Shannon W. Lucid

Al menos una vez cada día, a menudo muchas más, flotaba sobre la gran ventana de observación del módulo Kvant 2 de la Mir y me quedaba mirando la Tierra, allá abajo, o las profundidades del universo. Así durante seis meses. Ni una sola vez dejó de conmoverme la majestad de la vista. Pero, si soy sincera, lo más asombroso era que yo, niña en los días precursores del Sputnik, cuando la guerra fría, allá por los años cincuenta, estuviese ahora ahí, en una estación espacial rusa. De pequeña perseguía por la pradera del Panhandle texano ramitas de amaranto arrastradas por el viento. Ahora estaba en un vehículo que casi parecía una ramita cósmica y trabajaba y departía con dos rusos: un oficial de las fuerzas aéreas y un ingeniero. Hace diez años, la historia hubiera sido un capítulo exclusivo de ciencia ficción.

Las agencias espaciales estadounidense y rusa empezaron a principios de los setenta a considerar la posibilidad de una permanencia prolongada en el espacio. Tras el fin de la tercera misión del Skylab en 1974, el programa americano se centró en los vuelos de los transbordadores espaciales. Muy cortos. Pero los rusos seguían dilatando el tiempo que sus astronautas pasaban en órbita, primero en la estación espacial Salyut y luego en la Mir, que significa en ruso “paz”. A principios de los noventa, acabada la guerra fría, parecía de lo más natural que los Estados Unidos y Rusia cooperasen en la nueva era de la exploración espacial, la construcción de la Estación Internacional. Los rusos se incorporaron al consorcio —al que pertenecen también las agencias espaciales europea, japonesa, canadiense y brasileña— en 1993.

SHANNON W. LUCID es astronauta del Centro Espacial Johnson de la NASA en Houston. Ha participado en cinco vuelos espaciales, entre ellos su misión en la Mir, y suma en total 223 días en órbita.

La primera fase de este proyecto conjunto fue el programa Transbordador-Mir. La NASA planeó una serie de misiones del transbordador para enviar astronautas americanos a la estación rusa; estarían en la Mir unos cuatro meses y realizarían experimentos científicos muy diversos, sujetos a una exigente revisión de expertos. El transbordador espacial atracaría periódicamente en la Mir para el relevo de la tripulación y descargar suministros. Aparte de los objetivos científicos, la NASA quería aprender a trabajar con los rusos, ganar experiencia en vuelos espaciales largos y reducir los riesgos que supondrá la construcción de la Estación Espacial Internacional. Norm Thagard fue el primer astronauta americano que vivió en la Mir. Conmigo empezó —ocho meses después de que terminase la misión de Thagard— una ininterrumpida presencia estadounidense en el espacio que ha durado más de dos años.

Mi participación en el proyecto se remonta a 1994. Hacía ya quince años que era astronauta de la NASA y había volado en cuatro misiones del transbordador. A última hora de la tarde de un viernes me llamó por teléfono mi superior, Robert "Hoot" Gibson, jefe de la oficina de astronautas de la NASA. Me preguntó si estaba interesada en estudiar ruso a jornada completa, por si tenía que entrenarme en Rusia para ir a la Mir. Mi respuesta inmediata fue que sí. Hoot templó mi entusiasmo diciéndome que sólo se me apuntaba a estudiar ruso, y eso no quería decir necesariamente que fuese a ir a Rusia y mucho menos que volase en la Mir.



2. LUCID FLOTA LIBREMENTE en el Bloque Base de la Mir y posa para una foto patriótica tomada por uno de los cosmonautas el 4 de julio de 1996.

Colgué el teléfono y por un momento encaré las cosas como eran. Faltaba menos de año y medio para la misión en la quizá me embarcase. En ese plazo tendría que aprender una nueva lengua, no sólo para comunicarme con mis compañeros de tripulación, sino también para entrenarme en Rusia. Tendría que aprender los sistemas y las operaciones de la Mir y la Soyuz, la nave "de línea" que une la Tierra con la estación espacial. Yo viajaría en el transbordador espacial; no podía, pues, perder la costumbre de la nave americana y debería, además, dominar la serie de experimentos que realizaría en órbita.

¿Por qué me atraía la Mir? ¿Por qué se unían tantos países para construir una nueva estación espacial? Sin duda, por la investigación en el espacio. La gravedad influye en todos los experimentos que se hacen en la Tierra, menos los de las torres de caída libre o los aviones de vuelo parabólico. Pero en una estación espacial se pueden llevar a cabo investigaciones largas sin apenas peso, en un entorno microgravitatorio. Y la experiencia que se gana con una presencia humana continua en el espacio ayudará a que sepamos qué hará falta en los vuelos tripulados a otros planetas.

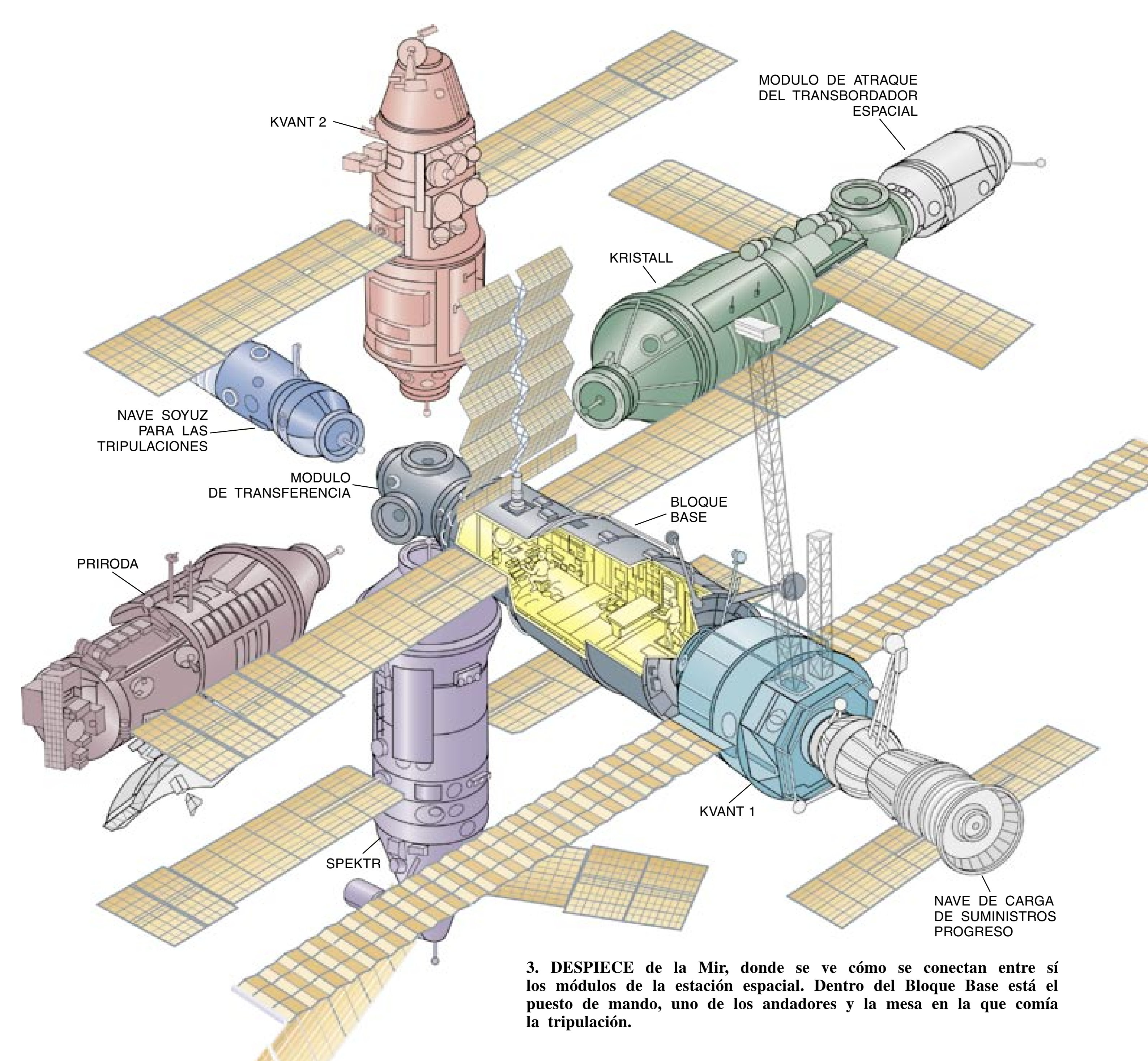
Desde un punto de vista, la misión Mir era una oportunidad perfecta para combinar dos de mis pasiones: volar en avión y el trabajo de laboratorio. Recibí mi licencia privada de piloto a los 20 años. No he dejado de volar desde entonces. Y antes de hacerme astronauta me doctoré en bioquímica por la Universidad de Oklahoma en 1973. Para una científica a la que le gusta volar, ¿podría haber algo más emocionante que trabajar en un laboratorio que da vueltas a la Tierra a 27.000 kilómetros por hora?

Llevaba tres meses de estudio intensivo del idioma cuando dieron el visto bueno para trasladarme a la Ciudad de las Estrellas, el centro de formación de astronautas cercano a Moscú. Llegué allá en enero de 1995, en pleno invierno ruso. Me levantaba cada mañana a las cinco para estudiar. Mientras iba a clase no dejaba de pensar en que un paso en falso sobre el hielo podría acabar con una pierna rota y el fin de mi sueño de volar en la Mir. Me pasaba la mayor parte del día en las aulas, asistiendo a clases sobre los sistemas de la Mir y la Soyuz, en ruso todas, ni que decir tiene. Por la noche seguía estudiando la lengua y viéndomelas y deseándomelas con manuales escritos en un ruso técnico. A medianoche caía rendida en la cama.

Nunca en mi vida he trabajado tanto como ese año. Acabar mis estudios universitarios con unos críos que casi no sabían ni andar fue en comparación un juego de niños. (Ahora mis tres hijos ya eran mayores y mi marido podía visitarme en Rusia.) Por fin, en febrero de 1996, pasados todos los exámenes médicos y técnicos requeridos, la comisión espacial rusa me admitió para integrarme en la tripulación de la Mir. Viajé a Baikonur, Kazajistán, a ver el lanzamiento de la Soyuz que llevaba a la Mir a mis compañeros de tripulación, un militar y un civil: el comandante Yuri Onufriyenko, oficial de las fuerzas aéreas, y el ingeniero de vuelo Yuri Usachev. Volví entonces a los Estados Unidos para entrenarme durante tres semanas con la tripulación de la misión STS-76 del transbordador. El 22 de marzo de 1996 despegamos del Centro Espacial Kennedy en el transbordador *Atlantis*. Tres días después atracaba en la Mir y yo me incorporaba oficialmente a la tripulación de la estación espacial; según lo proyectado mi estancia iba a ser de cuatro meses y medio.

La vida en la microgravedad

Dediqué mis primeros días en la Mir a conocer a Onufriyenko y Usachev —hablábamos sólo en ruso— y las cosas de allí. El diseño de la Mir es modular. Se construyó por etapas. La primera parte, el Bloque Base, se lanzó en febrero de 1986. En un extremo tiene conectado Kvant 1, que se lanzó en 1987,



3. DESPIECE de la Mir, donde se ve cómo se conectan entre sí los módulos de la estación espacial. Dentro del Bloque Base está el puesto de mando, uno de los andadores y la mesa en la que comía la tripulación.

y en el otro el módulo de transferencia, que hace lo que un pasillo en una casa, sólo que en vez de ser un corredor con puertas es una bola con seis trampillas. Kvant 2 (1989), Kristall (1990) y Spektr (1995) están atracados en ellas. Durante mi estancia los rusos lanzaron Priroda, el último módulo de la estación espacial, y lo conectaron al módulo de transferencia. Priroda contenía el laboratorio donde realicé casi todos mis experimentos. Guardaba mis pertenencias y dormía cada noche en Spektr. No tardaba mucho en llegar al trabajo: unos segundos nada más. Flotaba de un módulo al otro.

Los dos cosmonautas dormían en unos cubículos del Bloque Base. Casi todas las mañanas el despertador sonaba a las ocho. (Mir lleva la hora de Moscú, lo mismo que el control ruso de la misión en Korolev.) En unos 20 minutos estábamos vestidos y listos para una nueva jornada. Empezábamos por calarnos los cascos y el micrófono para hablar con el control de la misión. A diferencia del transbordador espacial, que transmite los mensajes por medio de un par de satélites de comunicación, Mir no está en contacto permanente con tierra. Los astronautas sólo pueden hablar con el control de la misión cuando la estación espacial pasa sobre uno de los centros rusos de comunicación en tierra. Por cada órbita hay uno de estos "pases" —cada 90 minutos más o menos— y vienen a durar unos 10 minutos. El comandante Onufriyenko quería que estuviésemos todos "al aparato" cada vez que se podía comunicar, por si nos querían decir algo desde tierra. Este hábito nos permitía determinadas pausas a lo largo del día. Nos reuníamos en el Bloque Base y antes y después de hablar con la misión de control departíamos un rato.

Tras el primer pase del día desayunábamos. Comíamos siempre juntos, flotando alrededor de una mesa del

Bloque Base. Antes del vuelo creía que el menú repetido me quitaría el apetito; mas, para mi sorpresa, tenía hambre en cada comida. Tomábamos alimentos deshidratados rusos y americanos, que reconstituíamos con agua caliente. Experimentábamos mezclando los contenidos de los recipientes para crear nuevos sabores. Cada uno tenía sus mezclas favoritas que recomendaba a los demás. Me gustaba tomar en el desayuno un sobre de sopa rusa —por lo usual *borscht* o de verduras— y zumo. Me gustaba almorzar o cenar cazuelas rusas de carne y patatas. A los rusos les encantaba la mayonesa americana; la ponían a casi todo.

Nuestras actividades diarias estaban detalladas en un horario que los rusos llamaban Formulario 24. Los cosmonautas se pasaban la mayor parte del día cuidando los sistemas de la Mir, mientras yo me encargaba de los experimentos de la NASA. Teníamos que hacer ejercicio todos los días para que no se nos atrofiasen los músculos en el entorno ingrávido. Solíamos ejercitarnos justo antes del almuerzo. En la Mir hay dos andadores mecánicos —uno en el Bloque Base, el otro en el módulo Kristall— y bajo una plancha del suelo del Bloque Base se guarda una bicicleta ergométrica. Seguíamos tres programas de ejercicio preparados por fisiólogos rusos; cada día hacíamos uno diferente, y repetíamos el ciclo. Cada programa nos llevaba unos 45 minutos; alternaban períodos de correr en el andador con ejercicios en los que tirábamos de cuerdas elásticas para simular las fuerzas gravitatorias que allí no sentíamos. Hacia el final de mi estancia en la Mir me pareció que tenía que hacer más ejercicio, y terminado el establecido corría unos kilómetros más en el andador.

De la vida en la Mir lo que menos me gustaba era el ejercicio diario. Era muy duro. Tenía que ponerme un arnés y atarlo con correas elásticas al andador. Para mantenerme unida al aparato debía tirar del correaje. Con un poco de práctica aprendí a correr. Además, me aburría sobremanera. El andador era tan ruidoso, que no podías conversar. Para distraerme me ponía el Walkman mientras corría, pero enseguida me di cuenta de que había cometido un gran error antes del vuelo. Había traído muy pocas cintas de música rápida. Por suerte había una gran colección en la Mir. En los seis meses de mi estancia las fui escuchando casi todas.

Acabados los ejercicios solíamos gozar de un largo almuerzo y volvíamos a trabajar. Muchas veces parábamos avanzada la tarde para tomar té. Cenábamos juntos. Para entonces habíamos terminado ya todas las actividades que nos asignaba el

Fuegos en caída libre

Howard D. Ross

En la Tierra la gravedad moldea las llamas. Los gases calientes suben y crean una corriente ascendente que aporta oxígeno al fuego. Pero ni en la Mir ni en el transbordador espacial hay corrientes ascendentes. Los fuegos obtienen oxígeno de la difusión —la lenta deriva de las moléculas por el aire— o de corrientes de aire generadas por ventiladores. El Centro de Investigación Lewis de la NASA ha dirigido unos experimentos encaminados a determinar la propagación de las llamas en un entorno microgravitatorio. Nuestra investigación ha arrojado luz sobre la física de la combustión y gracias a ella puede la NASA establecer mejor los riesgos de incendio en una nave espacial.

¿Ardería una vela en microgravedad? Shannon Lucid encendió velas de varios tamaños en una cámara construida por la NASA para aislar el experimento de la atmósfera de la estación espacial; lo hacía tocando las mechas con un anillo de alambre calentado por una corriente eléctrica. Inmediatamente tras cada ignición la llama de todas las velas era semiesférica, con un brillante núcleo central amarillo. Como iba llegando menos oxígeno a la llama la cera se consumía casi cinco veces más despacio que en tierra. Pero la carencia de una corriente ascendente de aire aumentaba la conducción descendente de calor, hacia la vela, y en dos minutos se derretía entera. El fuego, sin embargo, no se extinguía; la tensión superficial mantenía la bola turbulenta de cera líquida unida a la mecha y al candelero.





Una vela que ardería unos 10 minutos en tierra alumbraba durante 45 en la Mir. Tras la ignición, pasados de 4 a 10 minutos, las llamas, demasiado frías para crear un hollín amarillo y luminoso, se volvían azules (*a*). Eran tan débiles, que las cámaras de vídeo de la estación espacial carecían de sensibilidad para grabarlas, ni siquiera cuando se apagaban las luces de la cámara de combustión. Lucid observó el interior y registró los resultados con fotos fijas y apuntes sobre la marcha. Al extinguirse el fuego, le esperaba la mayor sorpresa. Cuando encendió las luces de la cámara vio que una gran nube esférica rodeaba la mecha (*b*). Creemos que contenía gotas de cera condensadas en el aire más frío. Este fenómeno proporcionó una lección útil para la extinción de incendios en una nave espacial: aunque el fuego esté apagado, puede que de su fuente sigan manando materiales inflamables.

Los astronautas de la Mir y del transbordador espacial han estudiado también la combustión de plásticos y celulosas, y medido a qué velocidad se extienden las llamas con distintas corrientes de aire. En un entorno donde el aire esté en calma, la mayoría de los materiales arde más despacio con microgravedad que en tierra. Pero si hay una corriente lenta de aire —de 5 a 20 centímetros por segundo— algunos materiales se vuelven más inflamables. Una hoja de papel, por ejemplo, sometida a una corriente lenta de aire se quemará un 20 por ciento más deprisa en microgravedad que en tierra. Este resultado aporta otra lección de seguridad espacial: la primera línea de defensa contra el fuego es aquietar el aire apagando los sistemas de ventilación.

Otros experimentos se centraron en los fuegos de chorros de gas, en la combustión de gotas de combustible, en las mezclas de hidrógeno y aire y en los hollines producidos, en microgravedad, por los fuegos. La Estación Espacial Internacional tendrá una cámara de combustión completamente equipada que permitirá el progreso de estos estudios.

HOWARD D. ROSS dirige el programa de investigación de la División de Ciencia Microgravitatoria del Centro de Investigación Lewis de la NASA en Cleveland.

Formulario 24, pero quedaban las tareas domésticas: recoger la basura, organizar la despensa, limpiar el agua que se había condensado en las superficies frías. Las sobras son un problema en la Mir. Tras descargar los nuevos suministros de la nave no tripulada Progreso, que atracaba en la estación cada pocas semanas, poníamos los residuos humanos y la basura en los vehículos vacíos, que se quemaban al reentrar en la atmósfera. Pero no solía quedar sitio en la Progreso para los muchos elementos del instrumental científico que ya no valían.

Tras la cena, el control de la misión nos mandaba por el teleprinter el Formulario 24 del día siguiente. Si había tiempo, tomábamos té y unas golosinas —pastas o dulces— antes del último pase del día, por lo normal entre las 10 y las 11 de la noche. Nos despedíamos y nos retirábamos a nuestros cubiles. Flotaba hasta Spektr, abría mi saco de dormir y lo enganchaba a una barandilla. Solía dedicar un tiempo a leer y a escribir en mi ordenador cartas a casa (las enviábamos a los controladores de tierra por radio y ellos las remitían a mi familia por correo electrónico). A medianoche apagaba la luz y flotaba hacia mi saco de dormir. Dormía a pierna suelta hasta que a la mañana sonaba el despertador.

4. LO PEOR de la vida en la Mir: tener que correr todos los días en un andador mecánico (*arriba a la izquierda*). Los controles principales de la estación espacial están en el puesto de mando del Bloque Base (*arriba a la derecha*). El cosmonauta Yuri Usachev se ganó un postre de gelatina por

Huevos de codorniz y trigo enano

Rara vez cambiaba nuestra rutina en la Mir. Sin embargo, los días no resultaban monótonos. Vivía el sueño de un científico. Tenía mi propio laboratorio y trabajaba por mi cuenta buena parte del día. Antes de que un experimento me aburriese, había que empezar otro, con un instrumental distinto y de un campo diferente. Comentaba mi trabajo al menos una vez al día con Bill Gerstenmaier, el director de vuelo de la NASA, o con Gaylen Johnson, el médico de vuelo en jefe de la NASA, los dos en el control ruso de la misión. Coordinaban mis actividades con los investigadores principales, los científicos estadounidenses y canadienses que habían propuesto y diseñado los experimentos. Muchas veces, cuando yo acometía un experimento, Gerstenmaier hacía que los







haber encontrado la zapatilla perdida de Lucid (*abajo*). Lucid hizo experimentos con unas bolsas transparentes interconectadas donde se guardaban unos huevos de codorniz (*abajo a la izquierda*) y con una "caja guante" especialmente construida para investigar llamas y fluidos.

investigadores principales se sumasen a nuestras conversaciones de radio, para que pudieran responder cualquier pregunta que tuviese que formular. ¡Y en Estados Unidos eso era en mitad de la noche!

A mí me tocaba la parte de a bordo de los experimentos. Los datos y las muestras volvían a tierra con el transbordador espacial y se mandaban a los investigadores principales para que los analizaran y publicasen los resultados. Creo que mi experiencia en la Mir muestra el interés de investigar en las estaciones orbitales tripuladas. En algunos de los experimentos observé fenómenos sutiles que se le escaparían a un vídeo o a una cámara de fotos. Como los aspectos científicos de todos los experimentos me eran familiares, podía a veces examinar los resultados sobre la marcha y modificar los procedimientos como hiciese falta. Y si fallaba el instrumental, pocas veces no lo arreglábamos yo o uno de mis compañeros. De los 28 experimentos programados en mi misión sólo hubo uno que no diese resultado por culpa de una avería del instrumental.

El primer experimento del que me encargué en la Mir fue el examen del desarrollo de los embriones de unos huevos de codorniz japoneses fecundados. Los huevos subieron a la Mir en el mismo vuelo que me llevó a mí y se trasladaron a una incubadora de la estación espacial. A lo largo de los 16 días siguientes retiré uno a uno los 30 huevos de la incubadora y los puse en una solución de paraformaldehído al cuatro por ciento, que los fijaba para su posterior análisis. Almacenaba luego las muestras a temperatura ambiente.

Con esta descripción puede que parezca un experimento sencillo; mas para llevarlo a cabo en un entorno microgravitatorio les hizo falta imaginación a los ingenieros. Las reglas de seguridad de la NASA y de los rusos exigen que la solución fijadora vaya con tres capas contenedoras; una gota que se escape puede flotar hasta el ojo de un astronauta y causarle quemaduras graves. Los ingenieros del Centro de Investigación Ames de la NASA diseñaron









un sistema de bolsas transparentes interconectadas para introducir los huevos en el fijador y abrirlos. Además, el experimento entero estaba metido en una bolsa mayor cuya superficie llevaba adosados unos guantes con los que podía llegar a su interior sin abrirla.

Acabada mi misión el Ames y varias universidades analizaron los embriones de codorniz; querían ver si diferían de los que se habían desarrollado en una incubadora en tierra. Es notable que el porcentaje de anomalías entre los embriones de la Mir fuese de un 13 por ciento, más del cuádruple que entre los embriones de control. Se cree que ese aumento se debió a dos factores: una temperatura un poco mayor de la incubadora de la Mir y unos niveles de radiación mucho más elevados en la estación espacial. Otros experimentos determinaron que la radiación media a la que se está expuesto en la Mir es como la que se recibiría con ocho radiografías diarias. No obstante, se cree que un astronauta tendría que pasar al menos varios años en órbita para que aumentase apreciablemente el riesgo de cáncer.

Participé también en un experimento a largo plazo sobre el cultivo de trigo en un invernadero, en el módulo Kristall. Se pretendía conocer el desarrollo y maduración de la simiente de trigo en un entorno microgravitatorio. Encierra una potencial aplicación importante: el cultivo de plantas daría oxígeno y alimentos a los vuelos espaciales largos. Se escogió una variedad enana de trigo porque crece deprisa. Planté las semillas en un lecho de zeolita, material granuloso y absorbente. Un programa de ordenador controlaba la cantidad de luz y humedad que recibían. Fotografiaba todos los días los tallos y medía su crecimiento.

En instantes determinados recogía unas plantas y las conservaba en una solución fijadora para su ulterior análisis en tierra. Una noche, tras unos 40 días de cultivo, vi apuntar las espigas en los extremos de los tallos. Se lo dije entusiasmada a mis compañeros de la nave, que flotaban por allí para echar un vistazo. John Blaha, que me sucedió en la Mir, cosechó las plantas maduras unos meses después y trajo más de 300 espigas a tierra. Pero en la Universidad de Utah descubrieron que eran vanas, estaban todas vacías. Se conjeturó que el nivel bajo de etileno en la atmósfera de la estación espacial podría haber impedido la polinización del trigo. En una investigación posterior en la Mir, Michael Foale plantó una variedad de colza que polinizó con éxito.

La microgravedad de la estación ofrece también una plataforma excelente para los experimentos de física de fluidos y ciencia de materiales. Se quería mejorar aún más el entorno reduciendo al mínimo las vibraciones. La Mir vibra un poco mientras gira alrededor de la Tierra, y aunque un ser humano no puede percibirlo, sí afecta a los experimentos sensibles. También los movimientos de la tripulación y las corrientes de aire en la estación generan vibraciones. Para protegerlos de estas perturbaciones realizamos los experimentos en el Bastidor de Aislamiento Microgravitatorio, un dispositivo construido por la agencia espacial canadiense. La mitad superior del bastidor de aislamiento flota; sólo se mantiene en un sitio gracias a unos campos electromagnéticos.

Tras comprobar a fondo el bastidor lo empleé para aislar un experimento metalúrgico. Puse unas muestras metálicas en un horno que las calentaba hasta fundirlas. Los metales líquidos se difundían en unos tubos pequeños donde se enfriaban despacio. Los investigadores principales querían determinar la difusión de los metales fundidos en ausencia de convección. (En un entorno microgravitatorio los líquidos y los gases más calientes no ascienden y los más fríos no se van abajo.) Tras analizar los resultados, vieron que la velocidad de difusión es mucho menor que en tierra. Durante el procedimiento, una de las bandejas del horno se combó y hubo riesgo de que no pudiera completarse el experimento. Pero Usachev sacó, sencillamente, la bandeja, la llevó a una mesa de trabajo y la alisó a golpe de martillo. Ni que decir tiene que en una nave no tripulada no habría sido posible una reparación así.

Muchos de los experimentos aportaron datos útiles a los ingenieros que diseñan la Estación Espacial Internacional. Los resultados de nuestras investigaciones de física de fluidos les están sirviendo para construir mejores sistemas de ventilación y de soporte vital. Y nuestra investigación sobre propagación de las llamas en la microgravedad quizá conduzca a unos mejores métodos de extinción de incendios en la estación.







5. LOS EXPERIMENTOS SENSIBLES se instalaban en el Bastidor de Aislamiento Microgravitatorio (*a la izquierda del todo*) para protegerlos de las vibraciones. Lucid anotaba sus observaciones en un ordenador portátil (*arriba a la izquierda*). Los miembros de la tripulación se inyectaban unos a los otros vacunas para estudiar sus sistemas inmunitarios (*arriba*) y se tomaban muestras de sangre (*arriba a la derecha*). Un aparato ruso examinaba el sistema cardiovascular de Lucid creando alrededor de la mitad inferior de su cuerpo un vacío (*a la derecha*).

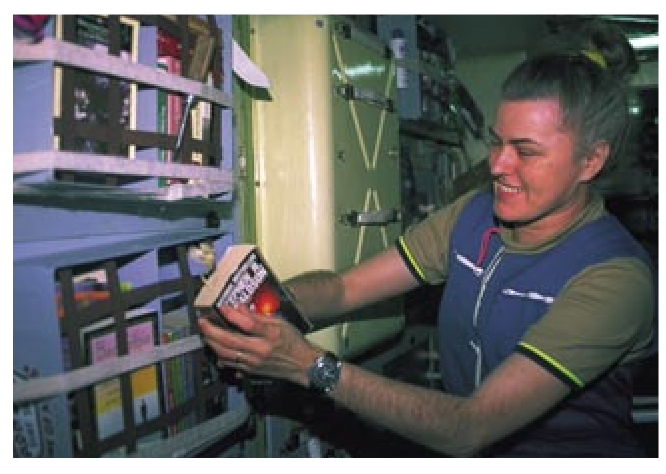
Seguridad espacial

Durante la misión acometí, además, observaciones terrestres. Oceanógrafos, geólogos y climatólogos le habían pedido a la NASA que se fotografiasen partes del planeta bajo distintas condiciones de iluminación y en diferentes estaciones. Tomaba las fotos desde la ventana de observación de Kvant 2 con una cámara Hasselblad. Vi que en un vuelo espacial prolongado se podía percibir el curso de las estaciones sobre la superficie del globo, lo que no sucede en las rápidas excursiones del transbordador. Cuando llegué a la Mir a finales de marzo las latitudes superiores del hemisferio norte estaban cubiertas de hielo y nieve, pero en unas semanas observé enormes fracturas en los lagos; el hielo se quebraba. En un abrir y cerrar de ojos el hemisferio norte resplandecía con el verde de la primavera.

Tomamos registro de sucesos inhabituales en la superficie de la Tierra. Cierto día, al pasar sobre Mongolia, vimos gigantescos penachos de humo, como si el país entero estuviese en llamas. La cantidad de humo nos impresionó tanto, que se lo contamos a los controladores de tierra. Unos días después nos dijeron que iban llegando noticias de unos inmensos incendios forestales en Mongolia.

Lo más importante en un vuelo tripulado largo no es la técnica de la nave sino la composición de la tripulación. La razón principal del éxito de la misión Mir estribó en que fuéramos tan compatibles el comandante Onufriyenko, el ingeniero de vuelo Usachev y





6. LUCID, USACHEV Y EL COMANDANTE Yuri Onufriyenko posan para una foto de grupo en el módulo Priroda (*a la izquierda*). Su amistad se conserva pasada la misión. Lucid leyó 50 libros en los seis meses que pasó en la Mir; guardaba algunos en una estantería de gravedad cero (*derecha*).

yo. Con mucha facilidad nos habrían separado la lengua, el sexo o la cultura, pero no fue así. Mis compañeros rusos ponían cuidado siempre en incluirme en sus conversaciones. Cuando era práctico colaborábamos en los proyectos. No nos pasábamos el tiempo criticándonos unos a otros; si se había cometido un error, veíamos cómo había sido, se corregía y olvidaba.

Dada la competencia de mis compañeros, siempre me sentí a salvo en la Mir. Cuando comenzó mi misión, la estación espacial llevaba ya 10 años en órbita, el doble de lo previsto. Onufriyenko y Usachev se tenían que pasar la mayor parte del tiempo cuidando de la estación, cambiando los elementos que fallaban y controlando los sistemas de los que depende el soporte vital. Descubrí enseguida que mis compañeros podían arreglar lo que fuera. Hay almacenadas muchas piezas de repuesto en la Mir, y la nave Progreso trae más a medida que se necesitan. A diferencia del transbordador espacial, la Mir no puede volver a la Tierra para efectuar reparaciones; se enseña a las tripulaciones a mantener la estación en funcionamiento.

En la Mir se dispone de tiempo para salir al paso de las averías. Si falla algo en el transbordador, hay que prestarle inmediata atención, pues es el único medio de volver a tierra; si se estropea una pieza de una parte vital del equipamiento, los astronautas han de repararla deprisa o terminar la misión antes de tiempo, lo que ha pasado algunas veces. Pero la Mir tiene un salvavidas: siempre lleva al menos una nave Soyuz adosada. Una avería en la Mir no amenaza la vuelta segura a casa de la tripulación. Mientras la estación espacial siga siendo habitable, los miembros de la tripulación pueden analizar qué ha pasado, hablar con el control de la misión y corregir el fallo o dejarlo.

Sólo dos situaciones fuerzan a la tripulación de la Mir a una pronta intervención: un incendio o una despresurización rápida. Ambas cosas ocurrieron en 1997, después de que yo me marchara. En los dos casos los tripulantes atajaron el daño.

Se suponía que mi misión había de terminar en agosto de 1996, pero mi vuelo de vuelta —la misión STS-79 del transbordador— se retrasó seis semanas mientras los ingenieros de la NASA estudiaban unas pautas anormales de combustión en los propulsores de estado sólido durante un vuelo anterior del transbordador. Cuando me enteré del retraso, mi primera reacción fue: "¡Oh, no!, ¡otro mes y medio de andador no!" A causa del retraso estaba todavía en la Mir cuando llegó una nueva tripulación rusa en la Soyuz que relevaba a Onufriyenko y Usachev. Para cuando por fin volví a tierra con el transbordador *Atlantis*, el 26 de septiembre de 1996, me había apuntado 188 días en el espacio, récord americano que aún perdura.

En junio ha vuelto a tierra Andrew Thomas, el último de los siete astronautas de la NASA que ha vivido en la Mir en estos tres años. Ha terminado el programa Transbordador-Mir. Basándome en mi propia experiencia, creo que se pueden sacar varias lecciones válidas para la Estación Espacial Internacional. La primera es que hay que escoger con cuidado la tripulación. Por mucho que la estación sea lo último en técnica futurista, si los tripulantes no disfrutan trabajando unos con otros el vuelo será una triste experiencia. Otra es que la NASA debe ser consciente de que un vuelo largo encierra sus peculiaridades. En un vuelo de dos semanas del transbordador —lo habitual—, los controladores de tierra de la NASA asignan alguna tarea a cada momento del tiempo de los tripulantes. Pero en uno largo habrá que tratarlos como si se hallaran en un laboratorio terrestre. Deberán tener algún control sobre su programación diaria.

De manera similar, cuando una tripulación se prepara para una misión en el transbordador espacial los miembros ensayan todos los procedimientos hasta que los hacen casi de forma mecánica. El entrenamiento para una misión de la Estación Espacial Internacional habrá de ser diferente. Cuando un tripulante empiece un experimento nuevo en un vuelo largo a lo mejor hará ya seis meses desde que se adiestrase para ello. Tendrá que pasar un tiempo repasando el experimento. El entrenamiento, pues, deberá atender no tanto a la reiteración de cada procedimiento concreto cuanto a la capacitación y habilidad que se necesitarán durante el vuelo. Los experimentos deberían diseñarse de forma que el astronauta conozca la ciencia que abarquen y pueda juzgar sobre la marcha qué hacer. Un tripulante cuya inteligencia cuenta es un tripulante feliz.

Cuando pienso en los seis meses que me pasé en la Mir se me agolpan los recuerdos. Pero hay uno que

Aprender de los desastres

El de 1997 no fue un año bueno para la Mir. El 23 de febrero el generador de oxígeno con combustible sólido del módulo Kvant 1 empezó a arder. Se creó una llama de soplete que alcanzó los 500 grados de temperatura. La tripulación de la Mir —de la que en esos momentos formaba parte Jerry Linenger— se precipitó hacia las máscaras de oxígeno y extintores. La espuma de agua destilada de éstos no pudo apagar el incendio, pero mantuvo frías las paredes de la estación espacial hasta que el fuego se consumió por sí solo 14 minutos después. No hubo heridos, pero la tripulación hubo de llevar mascarillas varios días por miedo a la contaminación por humo.

Cuatro meses después ocurrió un contratiempo aún peor. El 25 de junio el comandante de la Mir calculó mal el acercamiento de la nave de suministros Progreso mientras probaban un nuevo sistema de atraque de ésta en aquélla. La Progreso se estrelló contra una batería de paneles solares (*a la derecha*) y perforó el casco del módulo Spektr. Como el aire iba escapándose de la estación espacial, Michael Foale —que había reemplazado a Linenger el mes anterior— corrió a la nave de evacuación Soyuz y empezó a preparar la partida. Por suerte, la perforación era pequeña y la tripulación pudo sellar Spektr y represurizar el resto de la estación.

Bajo la impresión de los accidentes el Congreso de los Estados Unidos pidió que se revisara de arriba abajo el programa Transbordador-Mir. La NASA convocó dos comités para que estudiaran con qué seguridad se enviaban astronautas a la Mir; en septiembre se decidió seguir adelante con las dos misiones finales. Pero las críticas contra la NASA han suscitado preocupación acerca de la etapa siguiente del programa cooperativo, la construcción de la Estación Espacial Internacional. Muchos tipos de equipamiento usados en la Mir —incluidos los generadores de oxígeno con combustible sólido— se usarán también en los módulos rusos de la nueva estación espacial.



PANEL SOLAR deteriorado por el choque de la Progreso

A fin de reducir los riesgos de otro fuego o de otra despresurización, la NASA ha colaborado con los rusos para determinar las causas de los accidentes. Se desconoce todavía el origen del fuego. El generador con combustible sólido quema perclorato de litio para producir oxígeno. Las tripulaciones de la Mir emplean estos dispositivos como auxiliares del generador primario de oxígeno de la estación. Algunos ingenieros de la NASA creen que el generador con combustible sólido podría haber quedado dañado por los múltiples encendidos fallidos de su sistema de ignición. Los responsables rusos y americanos se proponen modificar este sistema y blindarlo más.

Las causas de la colisión de la Progreso están más claras. La prueba del nuevo sistema de atraque se planeó mal. Se suponía que Vasili Tsibliyev, comandante entonces de la Mir, calibraría la distancia entre la Progreso y la estación espacial mediante la imagen de vídeo de la Mir que tomaba una cámara instalada en la nave de suministro. Pero el ángulo de acercamiento era tal, que tras la Mir aparecía en el monitor de vídeo la Tierra y así era más difícil verla. Además, para la prueba, que se efectuó mientras la estación estaba incomunicada con tierra, se desconectó su radar.

Los encargados de la NASA desconocían estas deficiencias. Para evitar una colisión parecida en la Estación Internacional Espacial —que tendrá tres puertos de atraque para las naves rusas y europeas, y dos para el transbordador espacial—, los responsables americanos insisten en que se les permita examinar más las pruebas de atraque rusas. Dice Frank Culbertson, director del programa Transbordador-Mir: "Nuestras garantías de seguridad han mejorado. A los incidentes futuros nos enfrentaremos con una tripulación y un equipo en tierra más expertos."

—Mark Alpert, de la redacción

resume el legado del programa Transbordador-Mir. Una noche Onufriyenko, Usachev y yo habíamos cenado ya y flotábamos en torno a la mesa. Bebíamos té, comíamos pastas y charlábamos. Sentían curiosidad por mi niñez en Texas y Oklahoma. Onufriyenko habló del pueblo ucraniano donde pasó la suya; Usachev recordó su pueblo ruso. Al cabo de un rato nos dimos cuenta de que los tres habíamos crecido con el mismo miedo: a una guerra atómica entre nuestros países.

Viví mis años de colegio con terror a la Unión Soviética. Practicábamos alarmas de bombardeo en clase; nos acurrucábamos bajo los pupitres sin preguntarnos nunca por qué. De manera parecida, Onufriyenko y Usachev crecieron sabiendo que los bombarderos o los misiles de los Estados Unidos podían borrar de la faz de la Tierra los pueblos donde vivían. Nos maravillamos de adónde habían ido a parar las cosas. Ahí estábamos, juntos en una estación espacial con paz y armonía, viniendo de naciones que hacía sólo unos años eran enemigas juradas. Y, además, nos lo pasábamos muy bien.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DIARY OF A COSMONAUT: 211 DAYS IN SPACE. Valentin Lebedev. PhotoResource Research, 1988, y Bantam Books, 1990.

Hay información sobre el programa Transbordador-Mir en Internet en http://shuttle-mir.nasa.gov.

Hay información sobre la Estación Espacial Internacional en Internet en http://station.nasa.gov.

Genética y cognición

La investigación sobre capacidades cognitivas específicas ayuda a esclarecer la influencia de los genes en la conformación de componentes del intelecto

Robert Plomin y John C. DeFries

En punto a inteligencia y sus manifestaciones, puede decirse que no hay dos individuos iguales. Las diferencias se hacen patentes no sólo en clase, del parvulario a la universidad, sino también en el quehacer cotidiano: en el vocabulario que la gente usa y entiende, en la soltura para leer un mapa o seguir una ruta, en la facilidad de recordar números de teléfono o calcular el cambio de la compra. La variación observada en esas capacidades específicas es tan palmaria, que nadie se detiene en ella. Pero, ¿a qué se debe tamaña disparidad?

Parece razonable atribuir al entorno el origen de las diferencias en habilidad cognitiva. De acuerdo con esa tesis, somos lo que aprendemos. Nadie nace con un vocabulario desarrollado; todos hemos de aprender palabras. En el aprendizaje reside, pues, el mecanismo en cuya virtud surgen las diferencias en dominio del vocabulario entre individuos. Y las diferencias en la experiencia vivida —incidencia de los padres en el uso rico del vocabulario y en su estímulo para adquirirlo, así como el nivel de la docencia del lenguaje en las aulas— tienen que ser las responsables de las diferencias de aprendizaje manifestadas.

A comienzos de siglo dominaba en psicología la interpretación ambientalista de la diversidad en habilidades cognitivas. Pero hace ya algún tiempo que los psicólogos optan en su mayor parte por una explicación más equilibrada: naturaleza y crianza se imbrican en el desarrollo cognitivo. A lo largo de los últimos 25 años, la investigación genética ha ido forzando la atribución a la herencia de un papel sustancial en la configuración de los componentes del intelecto. Se buscan ahora los genes implicados en la función cognitiva. No se trata de negar la participación de factores ambientales en la modulación del proceso de aprendizaje. Antes bien, se sugiere que las diferencias génicas entre individuos condicionan la facilidad del aprendizaje.

¿En qué medida genes y ambiente influyen sobre habilidades cognitivas específicas, sobre dominio del vocabulario, pongamos por caso? De eso vamos a ocuparnos. Nuestro herramienta de trabajo será la genética cuantitativa, disciplina estadística que estudia las causas de la variación de los caracteres entre individuos. La comparación de resultados obtenidos por hermanos gemelos y niños





ROBERT PLOMIN y JOHN C. DeFRIES mantuvieron una relación de colaboración que perduró más de 20 años. Plomin trabaja ahora en el Instituto de Psiquiatría de Londres. DeFries dirige un instituto de genética del comportamiento de la Universidad de Colorado.

adoptados en ciertas pruebas sobre habilidades cognitivas, por ejemplo, permite apreciar la contribución respectiva de naturaleza y educación (o crianza).

Al revisar los resultados de pruebas realizadas por otros investigadores y nosotros mismos, hemos empezado a ver la luz sobre las relaciones entre determinadas características del intelecto (razonamiento verbal y espacial), así como sobre las relaciones entre la función cognitiva normal y ciertas discapacidades (la dislexia, por ejemplo). El recurso a la genética molecular nos llevará a identificar los genes que afectan a estas capacidades y discapacidades. Del conocimiento de los genes interesados, cabe esperar, se llegará a los mecanismos bioquímicos implicados en la inteligencia humana. Sonará entonces la hora de idear medios de intervención que moderen o prevengan los efectos de los trastornos cognitivos.

Ante la idea de un condicionamiento genético de la inteligencia, algunos se ponen en guardia alarmados o al menos denuncian su perfil confuso. Conviene, pues, dejar claro a qué nos referimos al hablar de influencia genética. El término "heredabilidad" es una medida estadística de la contribución genética a las diferencias entre individuos.

La heredabilidad nos dice en qué proporción las diferencias individuales en el seno de una población —la varianza— han de adscribirse a los genes. Al afirmar que un carácter presenta una heredabilidad del 50 por ciento indicamos que la mitad de la varianza en dicho rasgo está ligada a la herencia. La heredabilidad es, pues, una forma de explicar lo que hace a unos individuos diferentes de otros; no es lo que constituye la inteligencia de un individuo. En general, si la heredabilidad de un rasgo es elevada, la influencia de los genes sobre dicho rasgo será también muy intensa.

Los primeros pasos para acotar la heredabilidad de las capacidades cognitivas se dieron con el estudio de familias. El análisis de semejanzas entre padres e hijos y entre hermanos nos ha puesto de manifiesto que las habilidades cognitivas tienen que ver con el parentesco. Los resultados del estudio más amplio realizado con familias sobre las capacidades cognitivas, acometido en Hawai en los años setenta, ayudaron a cuantificar dicha similaridad.

En el estudio en cuestión trabajaron en equipo la Universidad de Colorado en Boulder y la de Hawai. Participaron más de 1000 familias y pares de hermanos. Se determinaron las correlaciones (un estadístico de la semejanza) entre parientes en pruebas de competencia verbal y espacial. Una correlación de 1,0 indicaría que las puntuaciones de los miembros de una familia eran idénticas; una correlación de cero indicaría que los resultados alcanzados no guardaban una similaridad mayor que los de cualquier otro par de personas elegidas al azar. Puesto que los niños comparten, en promedio, la mitad de los genes con cada progenitor y con sus hermanos, la correlación más alta en el resultado de las pruebas

1. LOS GEMELOS CONSTITUYEN SUJETOS IDEALES para investigar las capacidades cognitivas. Las parejas de gemelos idénticos (*página precedente*) y no idénticos (*abajo*) que aparecen en las fotografías participan en nuestros estudios. Realizan una prueba de competencia espacial en la que deben reconstruir un bloque modular de pisos con piezas de juguete. En este tipo de pruebas, que se ofrece a cada niño por separado, los resultados que obtienen los gemelos idénticos (con todos sus genes iguales) guardan un parecido mayor que los resultados de gemelos no idénticos (que comparten sólo la mitad de los genes), señal de que la herencia influye en la competencia espacial.





que cabría esperar, ciñéndonos a la genética, sería de 0,5.

El estudio de Hawai demostró que los miembros de una misma familia evidencian, en punto a mediciones de capacidades cognitivas específicas, un parecido mayor que los individuos no emparentados. En estas pruebas de competencia verbal o espacial, se observaron correlaciones de 0,25. Por sí solas, tales correlaciones no nos aclaran si su asociación por familias obedece a la genética o al entorno. Para resolverlo, se recurre a dos "experimentos": la gemelaridad (un experimento de la naturaleza) y la adopción (un experimento social).

PRUEBAS DE COMPETENCIA VERBAL

1. VOCABULARIO: Trace un círculo alrededor de la palabra que signifique lo mismo o casi lo mismo que la palabra subrayada. Hay sólo una opción correcta en cada línea.

a. <u>árido</u>	áspero	sagaz	modesto	seco
b. <u>picante</u>	afrutado	acre	nocivo	vertical

2. FLUIDEZ VERBAL: Escriba, en tres minutos, tantas palabras cuantas sepa que empiecen por B y terminen por N.

3. CATEGORIAS: Escriba, en tres minutos, una lista de todas las cosas que recuerde que sean PLANAS.

La investigación con gemelos constituye el caballo de tiro de la genética del comportamiento. Se compara el parecido entre gemelos idénticos, dotados de la misma composición genética, con su parecido de otros hermanos, que comparten sólo la mitad de los genes. Si las capacidades cognitivas vienen condicionadas por los genes, los gemelos idénticos ofrecerán, en los resultados de los tests de capacidad, un parecido mayor que los demás hermanos. A partir de las correlaciones observadas, se calcula en qué medida los genes explican la varianza en la población en general. Puede hacerse un cálculo somero de la heredabilidad doblando la diferencia entre correlaciones de gemelos idénticos y de gemelos no idénticos.

Pasemos al experimento social. La adopción nos enseña el camino más directo para averiguar cuánto de naturaleza y cuánto de educación o ambiente hay en las semejanzas familiares, toda vez que permite comparar parejas de individuos con parentesco genético si bien no comparten el mismo entorno familiar. Partiendo de las correlaciones entre parejas de estos individuos se calcula la parte que corresponde a la genética en la semejanza familiar. Asimismo, la adopción produce también parejas de individuos sin parentesco genético que comparten un mismo ambiente familiar; guiados por sus correlaciones se pondera la incidencia de un ambiente compartido en la similaridad.

Los estudios con gemelos sobre competencias cognitivas específicas, realizados a lo largo de tres decenios y en cuatro países, han dado

Capacidades cognitivas e inteligencia

Karen Wright

Desde los albores de la psicología nunca hubo acuerdo entre los expertos en torno la naturaleza de la inteligencia. Para unos se trataría de una facultad heredada, mientras que otros insisten en la importancia de la educación y la crianza en su conformación. Unos la consideran una cualidad global que penetra todos los aspectos de la cognición; otros opinan que el intelecto consta de capacidades especializadas discretas —el talento artístico o la facilidad para las matemáticas— sin que compartan un principio común.

De un tiempo a esta parte, con la incorporación de la genética, los psicólogos se inclinan por atribuir a la herencia un peso importante en la inteligencia. Hasta la mitad de la variabilidad individual manifestada cabría asignarla a factores genéticos.

Los psicólogos se adhieren en su mayoría a una descripción globalizante de la inteligencia. Esa competencia cognitiva general, o "g", así la denominan, se refleja en el solapamiento de unas habilidades cognitivas sobre otras. Como Robert Plomin y John C. DeFries señalan, las personas que no alcanzan una buena puntuación en las pruebas de una habilidad cognitiva suelen dar también valores bajos en pruebas que exploran otras. En esa correlación se apoyan las pruebas del cociente intelectual, que producen un valor único a partir de las valoraciones combinadas de distintas habilidades cognitivas.

Por guardar dicha relación la capacidad cognitiva general y las específicas, a nadie sorprenderá que los hallazgos referentes a las capacidades específicas sean en numerosas ocasiones un eco de lo que ya se conoce acerca de la capacidad general. La heredabilidad observada en habilidades específicas es similar a la heredabilidad que se ha determinado para "g". Las tendencias manifestadas durante el desarrollo —en que la influencia genética sobre capacidades cognitivas específicas aumenta a lo largo de la infancia y alcanza el nivel propio del adulto en la adolescencia— se repiten a propósito de la capacidad cognitiva general.

Puesto que las medidas de "g" derivan de intercorrelaciones entre la competencia verbal y la espacial, un gen que esté ligado a estos dos caracteres desempeñará alguna función en la capacidad cognitiva general; y viceversa. En un número reciente de *Psychological Science*, Plomin y sus colaboradores hacen público el descubrimiento del primer gen asociado con la capacidad cognitiva general. Aunque este hallazgo promueve el avance de nuestro conocimiento sobre la naturaleza de la cognición, es probable que reencienda el debate.

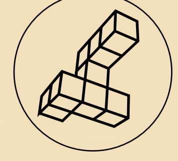
2. ENTRE LAS PRUEBAS de capacidades específicas a desarrollar por adolescentes y adultos se incluyen tareas similares a éstas. Las pruebas calibran cada capacidad cognitiva de varias maneras; las pruebas múltiples se combinan para obtener una medida fiable de cada capacidad. (*Las respuestas aparecen al final del artículo*.)

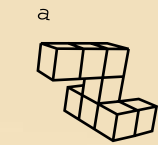
PRUEBAS DE COMPETENCIA ESPACIAL

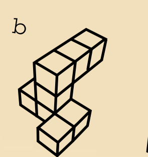
1. CORTES IMAGINARIOS: Trace una línea o líneas sobre la figura de la izquierda para indicar por dónde habría que cortar para conseguir las piezas que aparecen a la derecha. Puede haber más de una solución correcta.

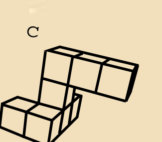


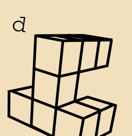
2. ROTACIONES MENTALES: Trace un círculo alrededor de los dos objetos de la derecha que sean iguales que el objeto de la izquierda.



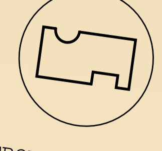


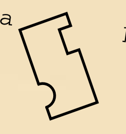


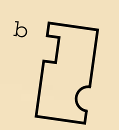


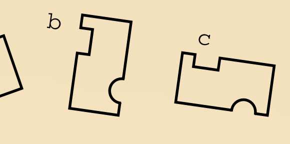


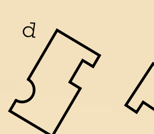
3. ROTACIONES DE FIGURAS PLANAS: Trace un círculo alrededor de los dos objetos de la derecha que sean iguales que el objeto de la izquierda.

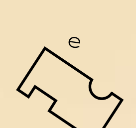




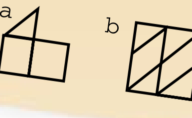


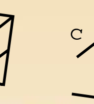


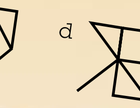


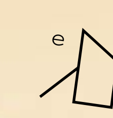


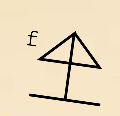
4. PATRONES OCULTOS: Trace un círculo alrededor de cada uno de los patrones en que esté incluida la figura ⅃. La figura debe permanecer siempre como está, nunca boca abajo ni acostada.

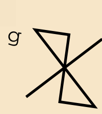












g

resultados harto coherentes. Las correlaciones entre gemelos idénticos superan con creces las de los gemelos no idénticos en lo que se refiere a competencia verbal y espacial en niños, adolescentes y adultos. Los resultados del primer estudio llevado a cabo con personas mayores —publicado el año pasado por el equipo de Gerald E. McClearn y por el de Stig Berg— ponen de manifiesto que las semejanzas entre gemelos idénticos y entre gemelos no idénticos persisten entrada la edad avanzada. Por más que los gerontólogos se empeñen en que las diferencias genéticas se van borrando con la acumulación de nuevas experiencias a lo largo de la vida, la investigación demuestra lo contrario. De acuerdo con los cálculos basados en hallazgos combinados de estos estudios, en la población general deberíase a la genética el 60 por ciento de la varianza en competencia verbal y alrededor de un 50 por ciento de la varianza en competencia espacial.

Las investigaciones con adoptados han llegado a conclusiones similares. Dos estudios recientes sobre gemelos educados por separado —uno de Thomas J. Bouchard, Jr., Matthew McGue y colaboradores, el otro de un proyecto internacional dirigido por Nancy L. Pedersen— atribuyen a la heredabilidad un 50 por ciento de ambos tipos de competencia: verbal y espacial.

En nuestro propio Proyecto sobre Adoptados en Colorado, iniciado en 1975, nos basamos en las posibilidades de la adopción para investigar el papel de los genes y del ambiente, para cribar tendencias de desarrollo en las capacidades cognitivas y para averiguar en qué medida se desarrolla la mutua interrelación entre capacidades cognitivas. El proyecto, que sigue vivo, compara las correlaciones entre más de 200 niños adoptados y sus padres, biológicos y de adopción, con las correlaciones de un grupo control de niños que han crecido junto a sus progenitores.

De los datos obtenidos se desprenden algunas ideas sorprendentes. Hasta la mitad de la infancia, por ejemplo, las madres biológicas y sus hijos adoptados por otros guardan un parecido similar al que registran los padres control y sus hijos, en cuanto a competencia verbal y espacial. La puntuación de los niños adoptados, sin embargo, no se asemejan en absoluto a la anotada por sus padres adoptivos. Estos resultados confieren un sólido respaldo a la idea de que un ambiente familiar común no fuerza la igualación entre los miembros de una familia. Antes bien, la semejanza basada en esos criterios diríase controlada por la genética; los factores ambientales contribuyen, a menudo, a hacer diferentes los miembros de la familia, no a igualarlos.

Los datos del proyecto de Colorado revelan también una interesante tendencia del desarrollo. La influencia genética aumenta durante la infancia; en la adolescencia, la heredabilidad alcanza un nivel equiparable al observado en adultos. En las correlaciones de competencia verbal, por ejemplo, la semejanza entre padres biológicos y sus hijos adoptados por otros aumenta aproximadamente de 0,1 a los tres años a 0,3 a los 16. Un patrón similar se manifiesta en las pruebas de competencia espacial. Según parece, en el comienzo de la escolaridad, a los siete años, se produce una transformación, genéticamente instada, de la función

cognitiva. Cuando se alcanza la edad de 16 años, la genética explica el 50 por ciento de la varianza en competencia verbal y el 40 por ciento en competencia espacial; valores ambos que no se apartan mucho de los que se obtienen a propósito de capacidades cognitivas específicas en los estudios con gemelos.

Con otros, el proyecto de Colorado ha contribuido también a arrojar luz sobre diferencias y semejanzas entre habilidades cognitivas. La neurología cognitiva admite la existencia de un modelo modular de la inteligencia; los diferentes procesos cognitivos se hallarían anatómicamente aislados en módulos discretos del cerebro. Dicha modularidad exige que las capacidades cognitivas presenten un fundamento genético distinto, vale decir, que el condicionamiento genético de la competencia verbal no debe solaparse con el condicionamiento genético de la competencia espacial.

Los psicólogos, sin embargo, admiten, desde hace tiempo, que la mayoría de las habilidades cognitivas especializadas, incluidas la competencia verbal y la espacial, guardan una moderada correlación mutua. Es decir, la gente que realiza con buenos resultados un tipo de prueba, también tiende a hacerlo bien con otros tipos. Así, es habitual que las correlaciones entre competencia verbal y espacial tengan un valor alrededor de 0,5. Unas correlaciones de este orden implican una potencial vinculación genética.

Tampoco la investigación sobre genética de las capacidades cognitivas específicas respalda el modelo modular. Todo indica, por contra, que los responsables del solapamiento entre las distintas capacidades cognitivas son los genes. El análisis de los datos del proyecto de Colorado, por ejemplo, señala que la genética gobierna el 70 por ciento de la correlación entre competencia verbal y la espacial. A resultados semejantes se ha llegado con gemelos en márgenes de edades que van de la infancia a la madurez. Parece, pues, harto probable que, cuando se consiga identificar qué genes están asociados con una determinada capacidad cognitiva, sean los mismos que condicionen otras capacidades cognitivas.

La investigación sobre resultados escolares da a entender que los genes asociados con las capacidades cognitivas podrían incidir en el rendimiento escolar. En los años setenta John C. Loehlin y Robert C. Nichols realizaron diversos estudios sobre más de 2000 pares de gemelos de secundaria. Observaron que los resultados alcanzados por gemelos idénticos guardaban un parecido mayor que los de gemelos no idénticos en cuatro áreas de conocimiento: lengua, matemáticas, ciencias sociales y ciencias naturales. A tenor de esa línea de trabajo, la genética respondería del 40 por ciento de la variación en las pruebas.

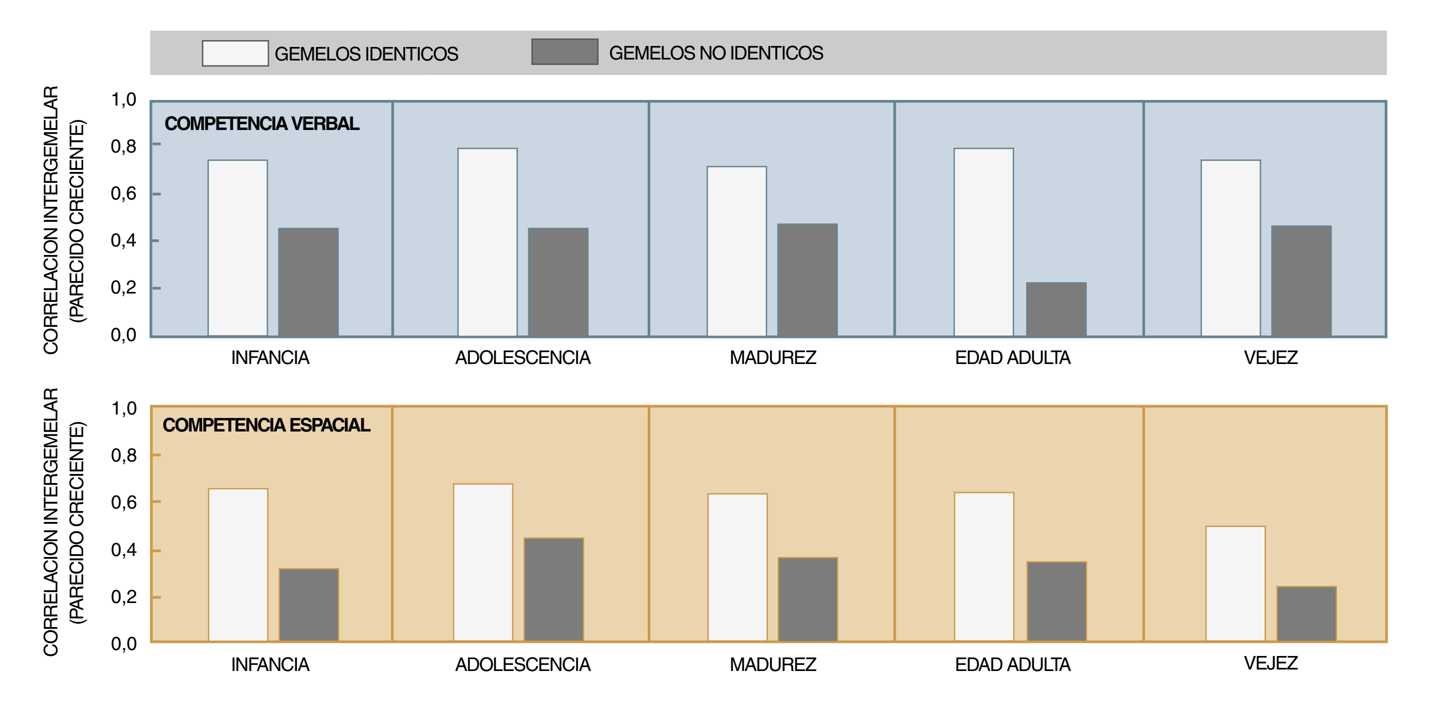
La influencia genética sobre el rendimiento escolar queda corroborada en estudios sobre gemelos de

¿Qué significa la heredabilidad?

El alcance de los registros de heredabilidad se interpreta a menudo de forma incorrecta. La heredabilidad es una medida estadística, que se expresa en términos de tanto por ciento, y describe el grado en el que los factores genéticos contribuyen a la variabilidad de un carácter determinado en el seno de una población.

El que los genes influyan en un carácter no significa, sin embargo, que "la biología sea determinista". La genética ha contribuido a confirmar la importancia de los factores ambientales, que suelen explicar la variabilidad del comportamiento humano en una cuantía pareja a la atribuida a la asignada a los genes. Si un 50 % de la inteligencia se hereda, otro tanto corresponderá a los factores ambientales en la explicación de las diferencias entre individuos.

3. EN LOS ESTUDIOS CON GEMELOS IDENTICOS y no idénticos se examinan las correlaciones de competencia verbal y espacial. Cuando los resultados de estudios distintos se comparan entre sí, se aprecia una notable influencia genética sobre las capacidades cognitivas de la infancia a la vejez; en todos estos grupos, los resultados obtenidos por gemelos idénticos guardan un mayor parecido mutuo que los de los gemelos no idénticos.



Aun cuando la genética tenga un peso notable, como en ciertos tipos de retraso mental, la implicación del entorno podría a menudo superar los “determinantes” genéticos. Sin ir más lejos, los efectos devastadores de la fenilcetonuria, una enfermedad congénita que arrastra un retraso mental, pueden anularse con una dieta adecuada.

Por último, el grado de heredabilidad de un carácter no es algo esculpido en roca. La influencia respectiva de genes y ambiente puede cambiar. Si los factores ambientales fueran casi idénticos para todos los miembros de una población hipotética, cualquier diferencia en la capacidad cognitiva en esa población tendría que atribuirse entonces a la genética, y la heredabilidad tendría valores cercanos al 100 por cien en lugar del 50 por cien. La heredabilidad describe lo que es, no lo que puede (o debería) ser.

—R.P y J.C.D.

primaria y en nuestro trabajo sobre niños adoptados. Los genes, tal parece, podrían influir en el rendimiento escolar lo mismo que en las habilidades cognitivas. Resultados que no dejan de sorprender ante la doctrina pedagógica imperante desde hace tiempo según la cual el rendimiento escolar era un producto del esfuerzo en mayor grado que de la capacidad. Y lo que reviste mayor interés: los efectos genéticos se solapan entre diferentes categorías de rendimiento y estos genes solapados son, verosímilmente, los factores genéticos que influyen en las destrezas cognitivas.

Estos datos prestan sólido apoyo a la tesis según la cual la inteligencia sería una cualidad difusa o global de la mente, es decir, no modular. Las observaciones recogidas no sólo destacan la importancia de las capacidades cognitivas en la vida real, sino que, además, sugieren que los genes relacionados con las capacidades cognitivas son los vinculados con el rendimiento escolar, y a la inversa.

Así las cosas, podría pensarse que las discapacidades cognitivas y un pobre rendimiento académico reflejaran a su vez un condicionamiento genético. Sin embargo, aun cuando haya genes implicados en trastornos cognitivos, no tienen por qué ser los mismos que influyen en las funciones cognitivas normales.

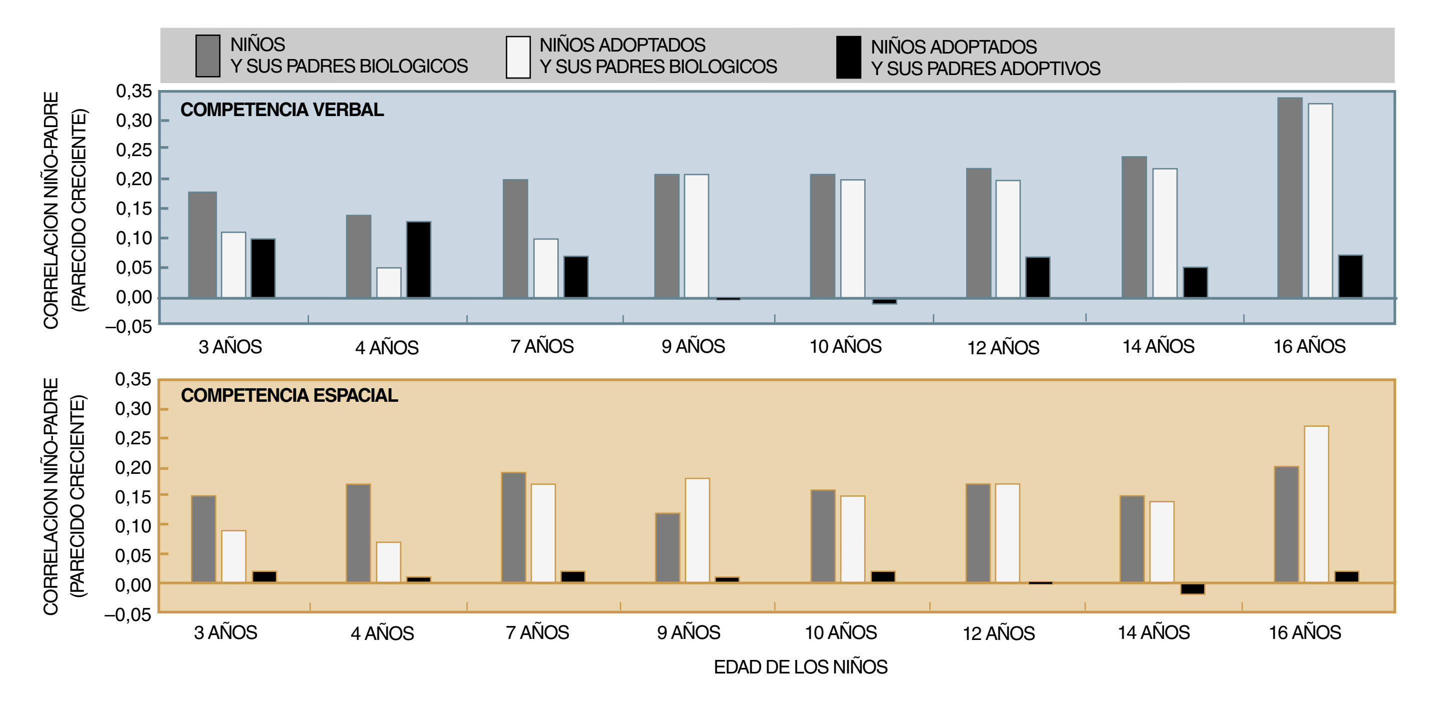
Lo vemos ilustrado en el retraso mental. En grado leve, es un fenómeno familiar; no, si se trata de un retraso grave. El retraso mental grave depende de factores genéticos y ambientales —mutaciones nuevas, complicaciones en el momento del parto y lesiones cerebrales— que no intervienen en la gama normal de la inteligencia.

Hay que sopesar los nexos genéticos entre lo normal y lo anómalo, entre los rasgos que son parte de un continuo y los trastornos reales de funciones cognitivas. No basta con darlos por supuestos.

En su mayoría los trabajos se han centrado en las dificultades de lectura. Afectan al 80 por ciento de los niños diagnosticados de algún trastorno del aprendizaje. Los niños con discapacidad para lectura, los disléxicos, leen con lentitud, su comprensión es limitada y tienen problemas para leer en voz alta. Uno de los autores (DeFries) ha demostrado que la dislexia constituye un fenómeno familiar en el que los factores genéticos explican el parecido. El riesgo de que la dislexia aparezca en los dos hermanos gemelos idénticos es del 68 por ciento si se ha diagnosticado en uno, mientras que cae al 38 por ciento si los gemelos no son idénticos.

¿Guarda este efecto genético alguna relación con los genes asociados con la variación normal de la competencia para la lectura? La pregunta plantea ciertos retos metodológicos. La propia idea de trastorno cognitivo es ya problemática, en el sentido de que se aborda la discapacidad desde una óptica cualitativa —se tiene o no se tiene— y no con una vara cuantitativa que mida el grado de discapacidad. Este enfoque abre un hiato analítico entre trastornos y caracteres que son

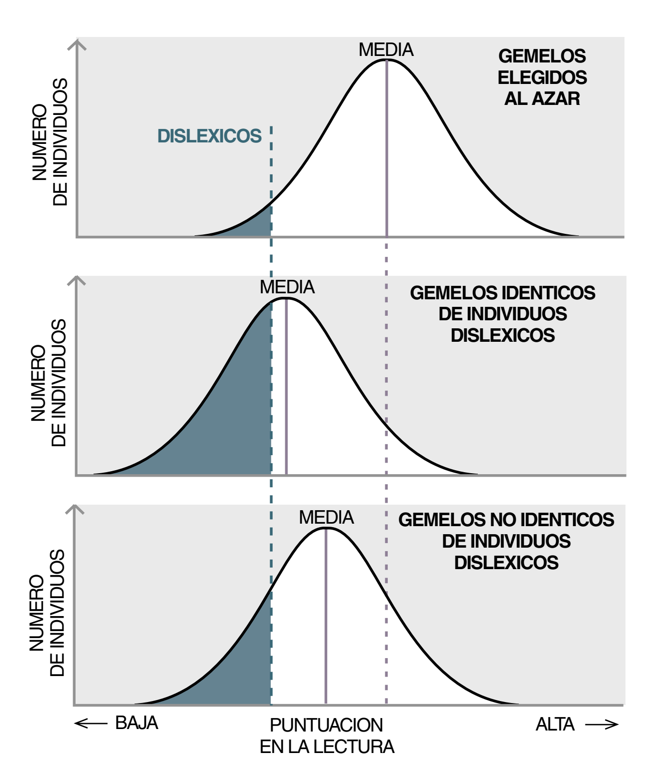
4. SEGUN EL PROYECTO DE ADOPCION de Colorado, en competencia verbal (*arriba*) y espacial (*abajo*) los niños adoptados se asemejan a sus padres biológicos (*barras blancas*), lo mismo que los niños educados por sus padres biológicos (*barras grises*). Por contra, los niños adoptados no acaban pareciéndose a sus padres adoptivos (*barras negras*). A tenor de la investigación, el grueso del parecido familiar en las capacidades cognitivas deriva de factores genéticos.



dimensionales (varían a lo largo de un continuo) y, por definición, cuantitativos.

A lo largo de los últimos diez años se ha desarrollado una nueva técnica genética que cubre ese intervalo entre dimensiones y trastornos al recoger información cuantitativa de familiares de individuos cuya discapacidad se diagnosticó de un modo cualitativo. Nos referimos al análisis DF de extremos, método así llamado en homenaje a sus creadores, DeFries y David W. Fulker.

En el caso de una discapacidad para la lectura, se procede a examinar gemelos idénticos y no idénticos sometiéndolos a pruebas cuantitativas de lectura. No basta con el diagnóstico de dislexia. Si la discapacidad para la lectura viene promovida por genes que afectan también a la variación normal en esa competencia, entonces los valores obtenidos en gemelos idénticos disléxicos deberían acercarse a los del grupo con igual trastorno más que a los valores de los gemelos no idénticos. (Un mismo gen puede ejercer efectos diferentes si presenta más de una forma en la población, de manera que dos personas pueden heredar dos versiones un tanto distintas. Ejemplos de este tipo de genes variables son los que determinan el color de los ojos y la altura.)



5. PUNTUACION en pruebas de lectura realizadas por gemelos. Revela un nexo posible entre habilidades normales y disminuidas para la lectura. En un grupo de miembros de parejas de gemelos (*arriba*) elegidos al azar, un número restringido presentaba discapacidad para la lectura (*azul*). Los resultados obtenidos por los gemelos idénticos (*en medio*) y no idénticos (*abajo*) de niños con discapacidad para la lectura fueron inferiores a los del grupo seleccionado al azar, y los de los gemelos idénticos fueron peores que los de los gemelos no idénticos. Los factores genéticos se hallan, pues, implicados en la discapacidad para la lectura. Los mismos genes que influyen en la discapacidad podrían esconderse tras las diferencias en la capacidad normal para la lectura.

En cuanto grupo, los gemelos idénticos con discapacidad para la lectura se asemejan a otros sujetos disléxicos en este tipo de pruebas cuantitativas, mientras que los gemelos no idénticos alcanzan mejores resultados que los del grupo de discapacitados (aunque peores que el resto de la población). Los genes implicados en la discapacidad para la lectura podrían ser, pues, los mismos que los involucrados en la dimensión cuantitativa de la capacidad para la lectura medida en este estudio. Además, de acuerdo con el análisis DF de extremos podría atribuirse a la genética alrededor de la mitad de la diferencia de la puntuación en la prueba de lectura entre disléxicos y población general.

En la discapacidad para la lectura podría entonces haber un nexo genético entre lo normal y lo anormal, sin que debamos generalizar ese vínculo a otras discapacidades. Cabe la posibilidad de que la discapacidad en cuestión represente el extremo último de un continuo de competencia para la lectura, no un trastorno definido; es decir, la dislexia podría representar un grado cuantitativo, más que una desviación cualitativa, a lo largo de la gama de esta capacidad. Si se descubriera, pues, un gen relacionado con la discapacidad para la lectura, no tendría nada de extraño que se hallara asociado con la gama normal de variabilidad de la competencia para la lectura. La prueba definitiva llegará cuando se identifique un gen específico que esté asociado con la competencia para la lectura o con la discapacidad correspondiente.

Hasta ahora nos hemos ceñido a la genética cuantitativa, una disciplina que mide la heredabilidad de rasgos, sin prestar mayor atención al tipo o número de genes implicados. Para esto último debemos recurrir a la genética molecular. Si logramos identificar los genes implicados en el comportamiento y caracterizar las proteínas que codifican, se abrirán nuevas posibilidades de intervención en las discapacidades.

En la investigación en ratones y mosca de la fruta se han identificado genes relacionados con el aprendizaje y la percepción espacial. El estudio de la variabilidad natural en poblaciones humanas ha conducido al hallazgo de mutaciones génicas que provocan retraso mental. Piénsese en las mutaciones de los genes relacionados con la fenilcetonuria y el síndrome del cromosoma X frágil, ambas causantes de retraso mental. Las deficiencias en genes individuales que están asociados con la distrofia muscular de Duchenne, el síndrome de Lesch-Nyhan, la neurofibromatosis de tipo 1 y el síndrome de Williams podrían hallarse también vinculados a las discapacidades cognitivas que se manifiestan.

Se conoce más de un centenar de mutaciones unigénicas que dañan el desarrollo cognitivo. El funcionamiento cognitivo normal se halla orquestado, casi con toda certeza, por muchos genes que actúan de una forma sutilmente coordinada, no por genes únicos que libran la guerra por su cuenta. Se supone que estos genes solidarios influyen en la cognición de una manera probabilística; se les denomina loci de caracteres cuantitativos, o QTL ("quantitative trait loci"). El nombre, que se aplica a los genes implicados en una dimensión compleja —la cognición, por ejemplo—, subraya la naturaleza cuantitativa de determinados caracteres físicos y conductuales. Se han identificado ya QTL en la diabetes, la obesidad y la hipertensión, así como en problemas de comportamiento involucrados en la sensibilidad y adicción a las drogas.

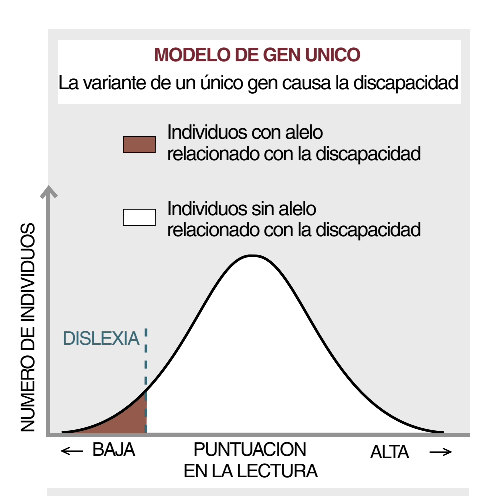
Ahora bien, encontrar los QTL es bastante más difícil que identificar mutaciones en un gen responsables de trastornos cognitivos. Fulker abordó el problema con un nuevo método, suyo y semejante al análisis DF de

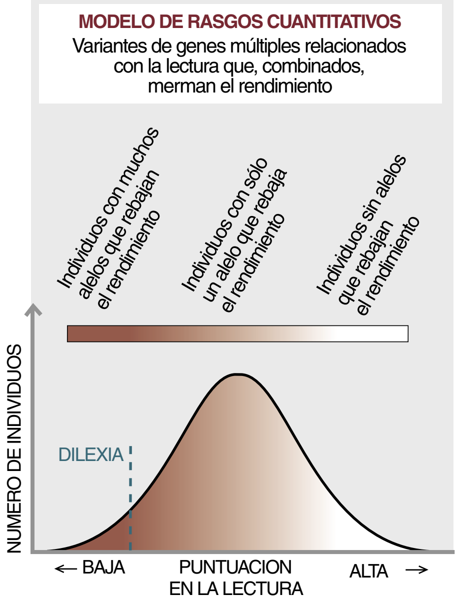
extremos; en él, las variaciones conocidas de ADN se correlacionan con diferencias en rasgos cuantitativos entre hermanos. La determinación genética se muestra con mayor nitidez en los extremos de una dimensión; por eso, el método funciona mejor cuando al menos uno de los dos hermanos representa el extremo del carácter en cuestión. En el centro de investigaciones de discapacidades del aprendizaje de la Universidad de Colorado se empleó esa técnica de ligamiento de QTL para acotar el sitio de los loci relacionados con la discapacidad para la lectura, objetivo que se consiguió. Los expertos de Boulder, Universidad de Denver y el Hospital Pediátrico Municipal de Omaha dieron a conocer este descubrimiento en 1994.

A imagen de otras técnicas de genética molecular, el ligamiento QTL se basa en la identificación diferencial de marcadores del ADN: segmentos de ADN de los que se sabe que ocupan un sitio determinado en los cromosomas y varían ligeramente de un individuo a otro. Las versiones de un marcador, igual que las de un gen, se llaman alelos. Puesto que las personas portan dos copias de cada cromosoma (salvo de los cromosomas X e Y que determinan el sexo en el varón), presentarán dos alelos de cada marcador de ADN. Ello significa que los hermanos compartirán uno, dos o ningún alelo de un marcador. En otras palabras, en lo concerniente al marcador, los hermanos serán gemelos idénticos (si comparten ambos alelos), gemelos no idénticos (si sólo la mitad de sus alelos) o hermanos adoptivos (si no comparten ningún alelo).

Los descubridores de los QTL relacionados con la discapacidad para la lectura identificaron un gemelo afectado; luego, averiguaron qué resultados obtenía su hermano gemelo en las pruebas de lectura. Si la puntuación alcanzada por el segundo era peor cuando compartían alelos de un marcador dado, el marcador debería caer cerca de un QTL relacionado con la discapacidad para la lectura, en la misma región cromosómica. Hallaron ese marcador en el brazo corto del cromosoma 6 de dos muestras independientes, una en hermanos mellizos y otra en hermanos de distintas edades. Se han confirmado los resultados.

Si bien esa línea de investigación ha propiciado que se delimite la localización de un gen (o genes) implicado en la discapacidad para la lectura, el gen (o genes) no se ha podido caracterizar todavía. Distinción que nos permite expresar la situación en que se encuentra la genética de la cognición: en el umbral de un descubrimiento importante. La identificación de genes que condicionan capacidades cognitivas específicas revolucionará la investigación de los procesos biológicos relacionados con la mente. La genética molecular tendrá, sin duda, profundas consecuencias en el estudio del comportamiento humano. Muy pronto se podrán investigar las conexiones genéticas entre diferentes caracteres y entre comportamientos y mecanismos biológicos. Y con ello seguir mejor la trayectoria del desarrollo de la influencia genética y establecer con mayor precisión las interacciones entre genes y entorno.





6. DOS MODELOS que ilustran la responsabilidad de la genética en la discapacidad para la lectura. Según la hipótesis clásica (*arriba*), basta una variante (*arriba*), o alelo, de un gen para causar el trastorno; quien porte dicho alelo estará discapacitado para la lectura (*gráfico*). Pero los datos abonan una explicación distinta (*abajo*): un alelo solo es incapaz de producir la discapacidad. Pero variantes de genes múltiples sí pueden actuar de forma conjunta para mermar el rendimiento y aumentar el riesgo de discapacidad.

El descubrimiento de genes vinculados con enfermedades y discapacidades facilitará la labor terapéutica y diagnóstica de los individuos en riesgo, antes de que se manifiesten los síntomas. Que las cosas avanzan en esa dirección lo vemos en el alelo ApoE4, asociado con demencia senil y declive de las capacidades cognitivas en la vejez. Los nuevos conocimientos traerán también nuevos problemas de índole ética. Las investigaciones genéticas siempre levantan temores de que los marcadores de ADN se utilicen para seleccionar "niños a la carta".

RESPUESTAS CORRECTAS DE LAS PRUEBAS

VERBAL: 1a. seco; 1b. acre

ESPACIAL: 1. 2. b, c; 3. a, c, d; 4. a, b, f

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GENETICS OF SPECIFIC READING DISABILITY. J. C. DeFries y Maricela Alarcón en *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, vol. 2, págs. 39-47; 1996.

BEHAVIORAL GENETICS. Tercera edición. Robert Plomin, John C. DeFries, Gerald E. McClearn y Michael Rutter. W. H. Freeman, 1997.

SUSCEPTIBILITY LOCI FOR DISTINCT COMPONENTS OF DEVELOPMENTAL DYSLEXIA ON CHROMOSOMES 6 AND 15. E. L. Grigorenko, F. B. Wood, M. S. Meyer, L. A. Hart, W. C. Speed, A. Schuster y D. L. Pauls en *American Journal of Human Genetics*, vol. 60, págs. 27-39; 1997.

Un cálculo del riesgo

Gary Stix

Meses antes de que las tormentas provocadas por El Niño empezaran a azotar las costas estadounidenses del Pacífico, el mundo financiero estaba ya haciendo preparativos para una climatología aberrante. Desde el año pasado, los inversores podían formalizar contratos cuyo valor dependiera enteramente de las fluctuaciones de la temperatura, de la pluviometría, de los granizos o de las nevadas. Estos derivados del clima habrían de indemnizar si, por ejemplo, la precipitación en el aeropuerto de Los Angeles hubiese estado comprendida entre 430 y 680 mm en el intervalo de octubre a abril. Proporcionan un medio para que una compañía de seguros se anticipe a futuras reclamaciones de sus asegurados o para la protección de los agricultores frente a pérdidas en la cosecha. Los contratos podrían servir, también, para ayudar a una compañía suministradora de combustible a afrontar faltas de liquidez debidas a que el invierno está resultando menos frío de lo esperado, para lo cual contrataría un umbral de temperaturas diarias, y la compañía percibiría una compensación si la temperatura no llegase a bajar de 18 ºC con la frecuencia esperada. “Estamos encantados con El Niño, porque nos ha traído muchísimo negocio”, comenta Andrew Freeman, director gerente de Worldwide Weather Trading, firma que formaliza contratos sobre lluvias, nevadas y temperaturas.

Los derivados del clima son indicadores de la difusión, cada vez mayor, de la ingeniería financiera. Esta nueva disciplina, basada en computación a gran velocidad y en intrincados modelos matemáticos creados por expertos en ciencias exactas, podría mitigar los imponderables de la gestión de una empresa a escala planetaria. Entraña el empaquetado “a la medida” de garantías y cauciones que aseguren los precios frente a una caída, sea del yen o del termómetro. A las incertidumbres y riesgos de un desplome de los mercados de valores, o a los avatares del próximo monzón, se les puede fijar un precio; el precio, dividido y ofertado en fragmentos vendibles, y vendidos a quienquiera esté dispuesto a afrontar el riesgo, a cambio de una prima o de un flujo de ingresos futuros. “La técnica permitirá la gestión efectiva y completa de los riesgos de toda una organización”, opina Robert A. Jarrow, de la Universidad de Cornell.

La ingeniería de útiles financieros ha nacido en respuesta a las turbulencias de los últimos decenios en unos mercados mundiales cada vez más interconectados: un resultado de la flotación de los tipos de cambio, de crisis petrolíferas, de convulsiones en los tipos de interés y desplomes de los mercados de valores. Continúa el lanzamiento al mercado de productos financieros originales e

1. EMANUEL DERMAN, de Golden Sachs, físico trocado en matemático financiero, muestra el dendrograma que él contribuyó a crear para poner de manifiesto la volatilidad de los índices de cotización de los valores.

La ingeniería financiera lo mismo reduce los riesgos que entraña la gestión de una multinacional que los propios de una economía doméstica. Pero los modelos matemáticos utilizados por esta disciplina pueden, a su vez, presentar un nuevo conjunto de riesgos

imaginativos con modos de caución y derivados cada vez más complejos: opciones de compra, contratos de futuros y otros productos originados en un bien subyacente, en un índice financiero, en un tipo de cambio entre divisas o de un tipo de interés. Derivados nuevos contribuirán a los servicios de suministro eléctrico a protegerse contra vaivenes de los precios y de la capacidad en mercados liberalizados. Derivados crediticios permitirán a los bancos trasladar a terceros el riesgo de morosidad en los créditos. Se ha llegado incluso a contemplar seguros para que las compañías puedan afrontar la "chinche informática" del año 2000.

Este fermento de actividad se desarrolla sobre un trasfondo más bien lucido. Los miles de millones de pérdidas acumuladas en las debacles de Procter & Gamble, Gibson Greetings, Barings Bank y análogos, han conferido a los derivados una imagen pública de multiplicadores del riesgo especulativo, no de nuevos tipos de seguro. También se han suscitado dudas sobre la integridad de las técnicas de modelización matemática que hacen posible el comercio de derivados.

A pesar de la pátina que la desluce, la ingeniería financiera recibió un vigoroso espaldarazo, la concesión del Nobel de economía a Myron S. Scholes y a Robert C. Merton, dos de los creadores de un modelo de apreciación de opciones, el cual ha contribuido a alimentar la explosión de actividad en los mercados de derivados.

Las opciones constituyen el derecho (pero no la obligación) de comprar o vender en cierta fecha, o antes de ella, acciones u otros bienes a un precio prefijado. Otra amplia clase de derivados, los anticipados o futuros, obliga al comprador a adquirir un bien a un precio prefijado en un momento establecido. Los canjes, que constituyen otro de los tipos de derivados, permiten a las compañías el intercambio de circulante; por ejemplo, un tipo de interés flotante a cambio de pagos a tipo fijo. La ingeniería financiera se vale de estos bloques constructivos para crear instrumentos económicos "cortados a la medida", que permiten proporcionar a los jubilados un retorno mínimo garantizado sobre sus inversiones, o que consienten a un servicio público atender sus futuras demandas de energía por medio de conciertos contractuales, sin tener que recurrir a instalar nuevas centrales.

La creación de instrumentos financieros complicados exige una metodología para la determinación precisa de los precios correspondientes a los derivados que forman sus partes constitutivas. Es relativamente fácil establecer el precio de un contrato de futuros. Cuando se eleva el costo del trigo, el precio de contrato de futuros sobre este bien se incrementa en la misma proporción. La relación entre ambos es, pues, lineal. En el caso de las opciones, no existe una correlación tan sencilla entre el producto derivado y el bien subyacente. Por esta razón, el trabajo de Scholes, Merton y Fischer Black ha adquirido tanta importancia, que un economista se sintió obligado a describir sus esfuerzos como "la teoría más útil, no sólo en los problemas financieros, sino de toda la economía".

Einstein y las opciones

La correcta evaluación de las opciones había tenido desconcertados a los economistas durante la mayor parte de este siglo. Desde 1900, con su ensayo *La teoría de la especulación*, que roturó terrenos nuevos, Louis Bachelier describió un procedimiento para poner precio a las opciones. Uno de los componentes de la fórmula que concibió a tal propósito fue precursor de un modelo que Einstein habría de utilizar en su descripción del movimiento browniano, el movimiento aleatorio de partículas diminutas en el seno de un fluido. Sin embargo, la fórmula de Bachelier contenía supuestos poco verosímiles desde el punto de vista financiero, como la existencia de cotizaciones negativas para los valores de bolsa.

También otros pensadores trataron de abordar el problema, entre ellos, Paul Samuelson, premio Nobel. Hicieron agua y se hundieron en la difícil empresa de calcular una bonificación por riesgo: un descuento en el precio de la opción que compensara la aversión del inversor a los riesgos y la insegura y móvil cotización del valor en el mercado.

Lo que Black, Scholes y Merton comprendieron fue que no era necesario estimar una bonificación por riesgo, pues ésta se encuentra ya entrañada en la cotización fijada para el valor, que constituye un dato crítico en la fórmula de la opción. El mercado se encarga de que la cotización actual de los valores de mayor riesgo descienda con respecto a su valor futuro esperado y lo haga más acusadamente que las inversiones estables; esa diferencia es el descuento asociado al riesgo inherente.

Black y Scholes, con la ayuda de Merton, idearon su fórmula para determinar los precios de las opciones construyendo una cartera hipotética en la cual cada variación en la cotización de un valor se compensaba con un desplazamiento en el valor de las opciones sobre el valor: la estrategia de neutralización. Demos un ejemplo. Sea una opción que confiera a su poseedor el derecho a vender ciertas acciones en el plazo de tres meses de ser cotizadas a 100 dólares o menos. El valor de la opción podría aumentar

50 centavos cuando el valor bajase 1 dólar (pues la condición en que la opción podría ser utilizada se ha tornado más verosímil) y disminuir 50 centavos cuando el valor subiese 1 dólar.

Para protegerse de las variaciones de cotización de las acciones, el inversor podría comprar dos opciones por cada acción que poseyera; en tal caso, la ganancia en las opciones compensaría la pérdida en el valor. La neutralización crea una cartera sin riesgo, una cartera cuyo retorno es el mismo que los bonos del tesoro. Dado que la cotización de las acciones varía con el tiempo, el inversor tiene que ir modificando la composición de esa cartera —la *ratio* del número de acciones de los distintos valores al número de opciones— para asegurarse de que su cartera de valores sigue sin riesgo.

La fórmula de Black-Scholes resulta de una ecuación diferencial en derivadas parciales que pone de manifiesto que el precio justo de una opción sería el que produjera un retorno sin riesgo dentro de esa cartera neutralizada. Las variantes de la estrategia de neutralización que Black, Scholes y Merton esbozaron, han demostrado ser de valor incalculable para bancos financieros y centrales, así como para otras instituciones, que pueden servirse de ellas para salvaguardar sus carteras de los vaivenes del mercado; por ejemplo, contra un descenso brusco de la cotización de los valores bursátiles.

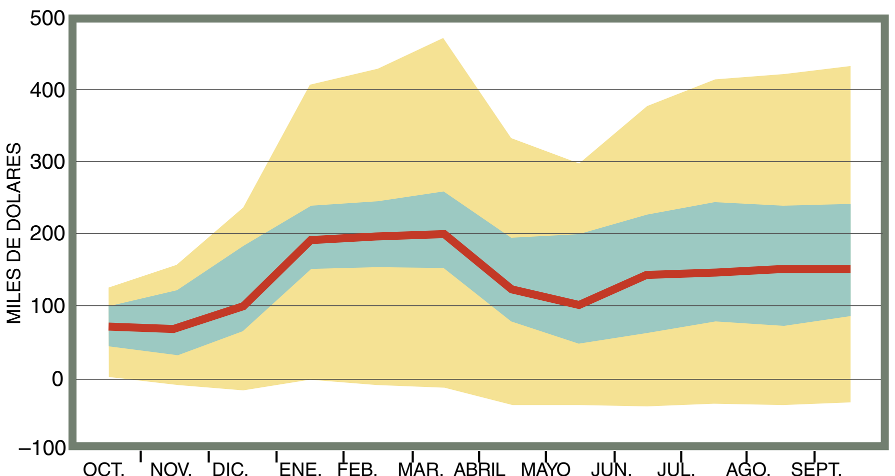


Podemos adaptar la metodología básica de apreciación de opciones a la creación de otros instrumentos, de nombre pintoresco (“corrillos”, “gritaríos”). Estas criaturas financieras poseen flexibilidad suficiente para configurar los pagos de la opción en función del perfil de riesgo de un cliente concreto, determinando un valor umbral, un techo o una función de promediación sobre los tipos de interés o de cambio, por ejemplo.

Con la opción adecuada, los inversores pueden apostar sobre cualquier tipo de incertidumbre, o eludirla, desde la volatilidad (movimientos de altibajo) del mercado hasta el riesgo de catástrofes naturales. Un exportador puede comprar una opción “retrospectiva” sobre divisas, para recibir el tipo de cambio dólar-peseta más favorable durante un período de seis meses, en vez de verse expuesto a un súbito cambio en los tipos de cambio en la fecha de expiración del contrato.

El artículo original de Black y Scholes, de principios de los años setenta, encontró dificultades para ver la luz. Cuando por fin llegó al *Journal of Political Economy* en 1973, su impacto sobre los mercados financieros fue inmediato. En pocos meses, su fórmula se programaba en las calculadoras. Wall Street la aceptó encantada, porque los agentes podían resolver la ecuación sin más que introducir unas cuantas variables, entre ellas, la cotización del valor, el tipo de interés de los bonos del tesoro y la fecha de expiración de la opción. La única variable que no podía obtenerse directamente era la correspondiente a “volatilidad del mercado”, esto es, la desviación estándar de las cotizaciones de los valores respecto a sus valores medios. Este número, sin embargo, podía estimarse a partir de los altibajos de las cotizaciones históricas. Análogamente, si el precio actual de la opción era conocido en los mercados, el agente podía introducir tal número en un ordenador y deducir un índice de volatilidad, útil para juzgar si una opción estaba sobrevalorada o infravalorada con respecto a la cotización actual del valor en el mercado.

Los inversores, al adquirir opciones, compran volatilidad, sea para protegerse de las turbulencias del mercado, sea para especular con ellas. Cuanto más acusadas sean las fluctuaciones de



2. LA NEUTRALIZACION por compra o venta de “futuros” permite que la planta de producción de una compañía eléctrica reduzca la incertidumbre en sus flujos de circulante, esto es, ingresos menos gastos (*línea roja*). La variabilidad de los circulantes —representada mediante intervalos de confianza del 80 por ciento— se reduce considerablemente con los futuros (*franja verde*) en comparación con el funcionamiento sin contratos (*zona amarilla*). Los futuros ponen límite a las caídas máximas de liquidez, pero también frenan las hipotéticas ganancias.



3. **CLASE de ingeniería financiera en la Escuela Sloan de Gestión de Empresas, adscrita al Instituto de Tecnología de Massachusetts. El aula reproduce la sala de operaciones de una agencia de cambio y bolsa.**

éste, tanto más valiosas las opciones. Un inversor que especula con una opción de compra de un valor puede perder sólo el costo de adquisición —la bonificación— en el caso de que el mercado no llegue a alcanzar la cotización a la que el comprador tiene derecho a efectuar la compra. Ahora bien, si el precio del valor se dispara por encima del precio de ejercitación, no hay límite para el posible beneficio. De forma similar, el inversor que practica la neutralización con opciones también está precaviéndose contra tiempos duros y puede, en consecuencia, adquirir protección frente a un desplome del mercado.

Físicos en Wall Street

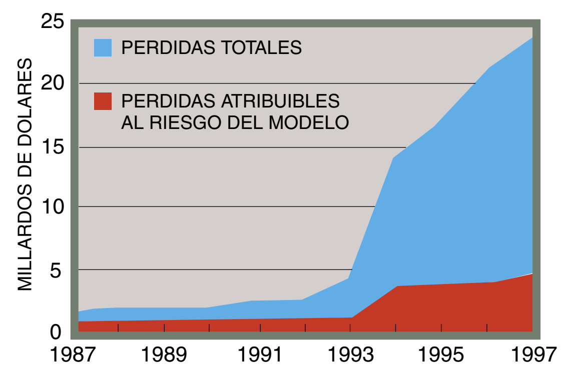
Aunque quepan en una calculadora de bolsillo, las matemáticas implícitas en la ecuación de Black-Scholes consisten en cálculos estocásticos, descendientes de la obra de Bachelier y Einstein. Estas ecuaciones no constituían en absoluto el proceder habitual de los programas de administración de empresas. Físicos, matemáticos, informáticos y econometras desempeñan ahora un importante papel en los colosos financieros de Wall Street.

La transición de los sincrotrones a las salas de compra-venta no siempre es indolora. "Cuando se contrata a un físico, uno está siempre confiando en que no imagine que los mercados están gobernados por leyes inmutables", señala Charles Smithson, director de CIBC World Markets, un banco de inversiones. "El uranio 238 siempre se desintegra en uranio 234. Pero un físico ha de tener presente que los mercados tanto pueden subir como bajar."

Algunas universidades han abierto recientemente "escuelas de cuantificación", con planes de estudios orientados a formar en matemáticas superiores aplicadas a las finanzas a titulados en administración de empresas, para que puedan comprender las sutilezas del lema de Ito y de otras piedras angulares del cálculo estocástico. O bien pueden formar a físicos, ingenieros y matemáticos para el tránsito hasta Wall Street. "Las presiones del mercado están llevando a los físicos a procurarse una formación más amplia, que les permita comprender la motivación y la intuición inherente a los problemas financieros", dice Andrew W. Lo, de la Escuela Sloan de Gestión, integrada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

En sus estudios, los ingenieros financieros se informan de los progresos de la modelización matemática subsiguientes al trabajo original de Black, Scholes y Merton. La fórmula de Black-Scholes original hacía supuestos poco realistas sobre el *modus operandi* del mercado. Toma como dato un tipo de interés fijo, pero, como es obvio, los tipos de interés varían, lo cual influye en el valor de cada opción, especialmente, en el de las opciones sobre bonos. La fórmula también presume que las variaciones de la tasa de crecimiento de las cotizaciones bursátiles obedecen a una distribución estadística normal, a una curva acampanada en la que los acontecimientos se agrupan en torno a la media. Resulta por ello incapaz de tener en cuenta sucesos extraordinarios, como el colapso de los mercados de valores en 1929 o en 1987. Black, Scholes y Merton, con legiones de cuantificadores, han dedicado los años siguientes a refinar muchas de las ideas originales.

Emanuel Derman, director del grupo de estrategias cuantitativas en Goldman Sachs, es un físico transmutado en cuantificador, cuya tarea, a lo largo de los 13 últimos años, ha consistido en habérselas con las imperfecciones de la ecuación de Black-Scholes. Derman se doctoró en la Universidad de Columbia en 1973 con una tesis sobre interacción débil entre partículas subatómicas. Estudió



4. **UNA INCORRECTA valoración de los derivados puede causar pérdidas, como expresa el concepto de "riesgo del modelo". La cifra acumulada correspondiente al período de 1987 a 1997 suma alrededor del 20 por ciento de todas las pérdidas dadas a conocer.**



5. LAS DEBACLES de los derivados han dado pie a una forma de humorismo peculiar.

luego dispersión de neutrinos, en la Universidad de Pennsylvania, y producción de quarks con encanto, en el departamento de física teórica de la Universidad de Oxford. A finales de ese decenio, decidió abandonar el mundillo académico. "La física es un trabajo solitario. Es una auténtica meritocracia. En física, a veces te sientes como si fueras [Richard] Feynman, otras sientes que no eres nadie."

En 1980 ingresó en los Laboratorios Bell, donde estuvo trabajando en un lenguaje de programación a la medida de las finanzas. En 1985, Goldman Sachs le contrató para que desarrollase métodos de modelización de los tipos de interés. Allí ha trabajado desde entonces, salvo un año, que pasó con Salomon Brothers. En Goldman, conoció al recién ingresado Fischer Black, y ambos empezaron a trabajar con otro colega, William W. Toy, en un método de valoración de opciones sobre bonos. Derman recuerda que Black era un hombre de una franqueza brusca, con hábitos de redacción muy puntillosos, ataviado con un reloj Casio Data Bank. "La potencia matemática de Black no corría pareja con su intuición", dice Derman. "Siempre tenía una idea de cuál era la solución correcta."

Física y finanzas

Gran parte del trabajo reciente de Derman sobre la volatilidad esperada de las cotizaciones bursátiles está encaminado a refinar el artículo original de 1973. La ecuación de Black-Scholes fue para las finanzas lo que la mecánica newtoniana fue para la física, afirma Derman. "La ecuación de Black-Scholes es el cimiento en el que se funda el resto de la especialidad. Nadie sabe qué hacer después, salvo generalizarla." Pero esta especialidad, teme, no logrará jamás producir su propio Einstein, ni una teoría unificada de todo para las finanzas. Las finanzas difieren de la física en que ningún modelo matemático puede captar la multitud de factores económicos en mutación continua responsables de las grandes perturbaciones del mercado.

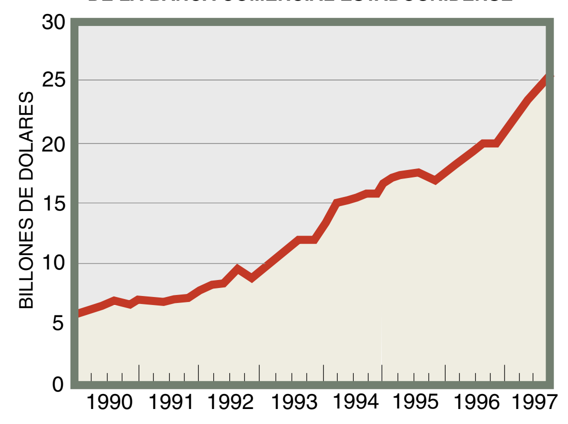
En el mundo académico los paralelismos entre física y finanzas se toman a veces con literalidad. Kirill Ilinski, de la Universidad de Birmingham, se ha servido de la teoría de electrodinámica cuántica de Feynman para modelizar la dinámica de los mercados, y se ha valido de nociones cuántico-electrodinámicas para deducir la ecuación de Black-Scholes. Ilinski reemplaza el campo electromagnético, que controla la acción de las partículas cargadas, por lo que él llama "un campo de arbitraje", que puede describir las variaciones en los precios de las opciones y de las acciones. (Se denomina arbitraje a la transacción que alinea el valor de las acciones y la cartera de opciones.)

La teoría de Ilinski muestra que la electrodinámica cuántica puede servir de modelo para la estrategia de neutralización de Black, Scholes y Merton, en la cual la dinámica del mercado dicta que cualquier ganancia en un valor será compensada por un decremento en el valor de la opción, produciendo así un retorno sin riesgo. Ilinski la equipara a la absorción de "partículas virtuales", o fotones, que amortiguan las fuerzas de interacción entre dos electrones. Muestra luego cómo este modelo de su campo de arbitraje explica oportunidades de obtener beneficios no contempladas en la ecuación de Black-Scholes original.

Ilinski es econofísico, neonata especialidad que celebró su primera conferencia el pasado mes de julio en Budapest. Pese a todo, el paralelismo literal entre la física y la economía financiera ha logrado escasos adeptos. "No se atiene a la muy sencilla regla que distingue a la ciencia de la bazofia", señala Nassim Taleb, asesor de Paribas, banco de inversiones francés.

La modelización matemática destinada a evaluar y neutralizar pérdidas constituye un ejercicio de estimación. La expresión "riesgo del modelo" pone de manifiesto que modelos distintos pueden dar lugar a una amplia diversidad de precios para un derivado, y que estos precios pueden ser causa de grandes pérdidas cuando discrepan de los precios de compra o venta en el mercado de un instrumento financiero.

El riesgo del modelo se origina en muchas causas. Un modelo puede, por su complejidad, determinar valoraciones erróneas para los derivados.



6. EL USO de derivados por los bancos comerciales sigue en aumento. El valor nocional representa el valor nominal del bien subyacente, el índice o el tipo del cual se derivan las opciones, anticipos, futuros y canjes.

Lo que puede ocurrir debido a que el modelo se funda en presunciones erróneas; por ejemplo, que no tenga en cuenta la volatilidad de los tipos de interés durante una crisis en los tipos de cambio. Muchos modelos no se desenvuelven bien ante cambios repentinos en la relación entre variables del mercado, como puede ser un salto brusco en el tipo de cambio entre el dólar estadounidense y la rupia indonesia. "El modelo, o la forma en que se emplea, dejan de captar lo que está pasando", opina Tanya Styblo Beder, directiva de Capital Market Risk Advisors, firma que evalúa la integridad de los modelos. "Las cosas cambian. Es como si condujeras cuesta abajo por una carretera de montaña, muy pendiente, creyendo que montas una bicicleta y dejándote llevar, y te encontrases con que tienes entre las manos un camión con remolque y sin frenos."

Los productos de ingeniería financiera cortados a la medida del cliente no cotizan en los mercados públicos de valores; se fundan en evaluaciones generadas por modelos, lo que hace a veces difícil comparar los precios calculados por los modelos con el precio de mercado de otros instrumentos. Cuando se trata de vender, el mercado puede ofrecer un precio distinto del estimado por el modelo. En ciertos casos, un agente podría capitalizar sobre presuntos errores en la determinación de precios, cometidos por el modelo de otro agente, con el fin de vender una opción sobrevalorada, práctica que se conoce por arbitraje de modelos.

"Existe el riesgo de aceptar modelos sin someterlos a una crítica atenta", dice Joseph A. Langsam, matemático que desarrolla modelos para efectos o valores de ingresos fijos en Morgan Stanley. Esta y otras firmas adoptan diversos medios de verificación, por ejemplo, la determinación del grado de acierto de sus modelos sobre derivados para los que existe un precio conocido.

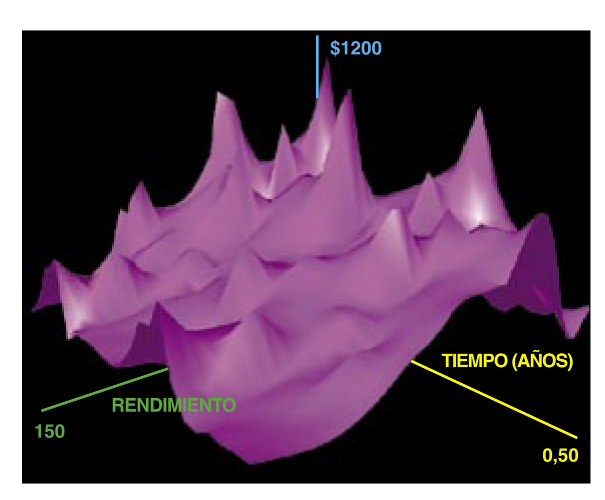
En un congreso celebrado en febrero, patrocinado por la revista *Derivatives Strategy*, se mantuvo una mesa redonda titulada "Lo primero, matar los modelos". Algunos de los participantes pusieron en duda la capacidad de los más refinados modelos matemáticos para equipararse, en la dinámica del mercado, a la destreza, la intuición y los arrestos de los profesionales. "Conforme se van complicando los modelos, se van usando, y en este aspecto son peligrosos, porque se emplearán de forma letal contra la salud económica del usuario", opinó Stanley R. Jonas, director del departamento de negociación de derivados para Société Générale/FIMAT. Un estudio de Jens Carsten Jackwerth, de la Escuela de Estudios Empresariales de Londres, y de Mark E. Rubinstein, de la Universidad de California en Berkeley, todavía no publicado, ha mostrado que las reglas empíricas de los profesionales para inferir la evolución de la volatilidad de índices bursátiles en el futuro lograban resultados superiores a los de los principales métodos de modelización.

Uno de los modelizadores presentes en la sesión, Derman, defendió su arte. "Parafraseando al Mao de los años sesenta: Que florezcan mil modelos", proclamó. Derman equiparó los modelos con los experimentos conceptuales de que se valen los físicos para comprender el mundo más claramente. "A Einstein se le ocurrió pensar cómo se encontraría uno sentado en el borde de una onda que se moviera a la velocidad de la luz, y lo que vería. Nosotros estamos haciendo algo parecido. Estamos, por así decirlo, investigando mundos imaginarios y tratando de aprovecharlos para ver cuál es el que mejor se aproxima al nuestro." Derman reconoció que todos los modelos son imperfectos: "Es necesario pensar en la forma de explicar las discrepancias entre los modelos y el mundo real."

Bombas de hidrógeno financieras

La imagen de los derivados se ha visto empañada por sonadas debacles financieras: bancarrotas del Barings Bank y de Orange County, pérdidas enormes de Procter & Gamble y de Gibson Greetings. Se ha citado a Felix Rohatyn, de la banca de inversiones, previniendo de los peligros de permitir que veintitantos gurús de la informática se dediquen a la concocción de "bombas de hidrógeno" financieras. Hay empresas y gobiernos que en sus carteras de valores han eliminado los derivados; se ha suscitado incluso el temor de que todo el entramado financiero se venga abajo.

Los creadores de estos nuevos e intrincados instrumentos enmarcan las pérdidas en una perspectiva más amplia. El valor nocional, o valor facial, de todas las acciones, bonos, divisas y demás valores sobre los cuales se han derivado contratos de



7. LA "PRUEBA DE ESFUERZO" de los derivados del tipo de interés en el Banco de Nova Scotia revela de qué modo influyen en la cartera de valores las fluctuaciones del mercado.

opción, de futuro o de canje, sumaban 56 billones de dólares en 1995, según el Bank for International Settlements. El valor de mercado de los contratos de derivados más notables representa sólo unos cuantos puntos porcentuales de la cifra global, cifra, empero, que todavía puede sumar unos cuantos billones de dólares. En contraposición, las pérdidas conocidas en derivados, entre 1987 y 1997, sumaron en total 23.800 millones de dólares. También los inversores pueden salir mal parados con otras inversiones más habituales. En 1994, cuando se dispararon los tipos de interés, los mercados de bonos del tesoro perdieron 230.000 millones de dólares.

Los derivados son noticia porque, lo mismo que en un accidente aéreo, sus pérdidas pueden producirse de forma impresionante y repentina. Los contratos pueden tener efectos multiplicativos. Un inversor en derivados puede aportar tan sólo una pequeña fracción del valor de un bien subyacente, por ejemplo, acciones o bonos. Un pequeño tanto por ciento de variación en el valor del bien puede producir en el derivado una gran variación porcentual de ganancia o de pérdida.

Con el fin de gestionar los riegos que entraña la posesión de derivados y de otros efectos, las instituciones financieras buscan cobijo en otros modelos matemáticos. Gran parte de este trabajo tiene sus raíces en la teoría de la cartera de valores, una metodología de optimización y medición estadística por la cual le fue concedido en 1990 el premio Nobel a Harry M. Markowitz. Markowitz elucidó la forma en que los inversores podrían minimizar los riesgos correspondientes a un determinado nivel de retorno, diversificando en una gama de bienes que no presente el mismo comportamiento al cambiar el mercado.

Markowitz creó la noción de "valor en riesgo". Establece un conjunto de técnicas que deduce para las pérdidas en inversiones un único número, correspondiente al caso más desfavorable. El valor en riesgo calcula la probabilidad de las pérdidas máximas para cada cartera, desde el dinero en efectivo hasta los derivados. A continuación deduce un valor en riesgo para la exposición global de la compañía, por ejemplo, que el peor revés que se puede esperar en los 30 próximos días, con un intervalo de confianza dado, podría llegar hasta 85 millones de dólares. Un análisis de la cartera hace ver en qué puntos están concentrados los riesgos.

Philippe Jorion, profesor de economía de la Universidad de California en Irvine, ha realizado un estudio ejemplar que indica cómo las medidas de valor en riesgo podrían alzar banderolas de precaución incluso a los inversores menos avezados. Los consejos escolares de Orange County que invirtieron en el fondo del condado —que perdió 1700 millones de dólares— podrían haber reaccionado de diferente modo de haber sabido que había un 5 % de probabilidad de pérdidas superiores a 1000 millones de dólares.

Al igual que otras técnicas de modelización, el valor en riesgo ha suscitado escepticismos sobre su capacidad para pronosticar los altibajos del mundo real. Las técnicas de medición más difundidas se apoyan en datos históricos del mercado, sin lograr captar la magnitud de fenómenos raros, pero de gran intensidad. "Si tomamos el conjunto de todos los datos del año pasado, puede que veamos que una cartera varía solamente en un 10 por ciento. Un mes más tarde, las cosas pueden cambiar un ciento por ciento", comenta Ron S. Dembo, presidente de Algorithmics, una compañía de programas de gestión del riesgo. Algorithmics y otras empresas van más allá de los métodos de valor en riesgo y suministran a los bancos programas con los que someter a sus carteras a "pruebas de esfuerzo", por simulación de las ramificaciones de grandes vaivenes del mercado.

Una técnica de modelización puede engendrar otras, y es seguro que no cesarán los debates acerca de su valor intrínseco. Pero la capacidad de poner precio a la incertidumbre, que constituye la esencia de la ingeniería financiera, ha demostrado ya su utilidad en otros contextos empresariales, así como en la preparación de políticas gubernamentales y en la economía doméstica. La teoría de opciones puede hacer más fácil la cibernética de las inversiones de capital. Un análisis de inversiones tradicional podría sugerir que a una compañía eléctrica le conviene más asignar presupuesto a una gran central de carbón, con capacidad de crecimiento durante 10 o 15 años. Pero tal metodología sacrificaría otra opción, la construcción de una serie de pequeñas plantas de fuel-oil, que resultaría más rentable si el crecimiento de la demanda fuera más lento de lo esperado. Las técnicas de apreciación de las opciones pueden asignar valor a la flexibilidad de una senda de crecimiento lento.

Se ha invocado también el modelo Black-Scholes para cuantificar los beneficios de proporcionar una educación general a la población laboral de un país en desarrollo, en lugar de impartirle enseñanzas especializadas. Revela que el valor de poder cambiar rápidamente la capacitación laboral, adaptándola a los giros de la economía, puede superar el superior costo de una educación básica amplia. La fijación de precios sobre opciones puede servir incluso para evaluar la flexibilidad de elegir un médico "fuera del seguro" para la atención sanitaria gestionada. "Las consecuencias no se encuentran sólo en los mercados financieros directos, sino en la capacidad de aplicar esta técnica a la organización de firmas no financieras y, en general, de la organización de la vida económica de todos nosotros", dice Merton. La fijación de precios a las veleidades del futuro puede hacer más viable la visión de otro Nobel: Kenneth J. Arrow, de la Universidad de Stanford, quien imaginó una caución para todas las posibles situaciones que pudieran darse en el mundo y que cualquier riesgo, desde la bancarrota hasta una excursión al campo echada a perder por la lluvia, pudiera trasladarse a otro.

PERFILES

Tim Beardsley

THOMAS B. COCHRAN: Espejo de ecologistas

Thomas B. Cochran no aparta el ojo de la pantalla de su ordenador. Pasa las páginas de una lista con cientos de blancos que forman el plan de un ataque nuclear contra Rusia. Los enclaves estratégicos, numerados y con sus nombres correspondientes, están clasificados por categorías: radares de misiles antibalísticos, centros de control de lanzamiento, muelles de submarinos, campos de silos.

Con su deje de Tennessee, se me disculpa por no disponer todavía de las coordenadas geográficas exactas de todos los silos de misiles; en ello está. Y como es experto en armas nucleares y consejero del Departamento de Energía (DOE), que supervisa los arsenales nucleares, sabe qué ojivas hay que usar contra cada blanco. "La información es sumamente importante en este asunto", comenta secamente.

Cochran dirige el programa nuclear del Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales. Allí lleva 20 años utilizando tácticas agresivas de presión política (una especie de guerra de la información) para que los Estados Unidos no se supediten tanto al armamento nuclear. "La gente del Capitolio no te presta atención hasta que sales en el *New York Times* o en *Scientific American*", se queja. "No me queda más remedio que poner pleitos para conseguir publicidad."

El plan consiste en elaborar una lista de los blancos nucleares que reproduzca con toda la fidelidad posible la mismísima lista secreta del Pentágono. "Parece que redujeron la lista de blancos el pasado diciembre de unos 11.000 a unos 2000 en Rusia más 500 en otros sitios", observa. Y con las mismas, deja escapar el nombre del oficial del Consejo Nacional de Seguridad que redactó los nuevos "criterios" para la selección de blancos; señala que permite explícitamente que los militares apunten a armas no nucleares de destrucción masiva. Cochran, con Christopher E. Paine y Matthew G. McKinzie, planean utilizar los blancos de su base de datos casera para modelizar los efectos de posibles situaciones de guerra, de manera que tendrán mejor información para montar nuevas campañas para cañonear el DOE. "Mostraré lo absurdo que es almacenar tantas armas", declara.



El detector de germanio de rayos gamma lo utilizó Cochran en un buque de guerra soviético para demostrar que con esos aparatos se pueden identificar las cabezas nucleares y verificar así los tratados de armamento

También pleitea para impedir que el ejecutivo se desvíe de los reglamentos establecidos. Su historial (extraordinario desde cualquier punto de vista) se basa en el análisis técnico —Cochran estudió física y matemáticas—, no en la sociología o la política. Frank von Hippel, un experto en armas nucleares de la Universidad de Princeton, dice que Cochran abrió nuevos caminos cuando en los años setenta publicó un análisis sobre el reactor nodriza Clinch River que descalabró el proyecto, un gigantesco programa del gobierno para desarrollar un reactor que hubiera producido más combustible del que consumía. La lógica del gobierno "descansaba sobre varias hipótesis clave, ninguna de las cuales resultó ser correcta", relata con aire sombrío. "Era un absoluto despropósito." Cochran luchó contra el reactor durante 12 años, con argumentos económicos y ambientales, hasta que el Congreso canceló el plan en 1983. "Hay que estar dispuesto a aguantar el tipo", advierte contra los activistas de salón o de fin de semana.

Cochran "es osado y tenaz", subraya von Hippel. Y a pesar de sus modales afables, es muy capaz de hacer "afirmaciones descarnadas", prosigue von Hippel, que ha sido funcionario del gobierno y ha sufrido algunas de las invectivas de Cochran.

El DOE recluta ahora a Cochran para sus comités asesores. Pero si el objetivo era doblegar su oposición al ministerio, van errados. El experto del gobierno que se encarga de la Planta Nacional de Ignición, una máquina gigantesca de fusión por láser que se halla en construcción en el Laboratorio Nacional Lawrence de Livermore, intentó obtener la aprobación de Cochran para su plan. Rehusó éste concederla y

acabó por llevar al DOE a los tribunales, contendiendo la decisión de crear un comité en la Academia Nacional de Ciencias para que diera su dictamen sobre el proyecto.

En el comité, recuerda, abundaban las personas con intereses económicos en el programa de armas del DOE y del Lawrence de Livermore. Aun así se le pedía su juicio sobre la conveniencia de construir el aparato. La componenda acabó en los tribunales. Como resultado, el DOE no puede hacer uso del trabajo de ese comité.

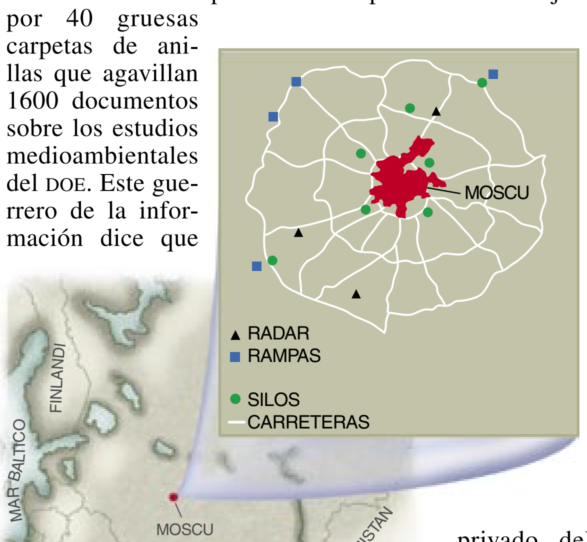
La Academia Nacional de Ciencias tembló ante la perspectiva de tener que abrir al público todas las reuniones de los comités. Como respuesta a ese traspiés, el Congreso aprobó a toda prisa unas leyes que conceden voz a los grupos independientes, como el de Cochran, en la composición de los comités que asesoran al gobierno. El compromiso también abre al público las sesiones investigadoras de tales comités.

Cochran y sus asociados negocian ahora con los abogados del DOE un compromiso en una ofensiva legal más amplia sobre el Programa de Custodia y Gerencia de los Arsenales, apoyado por la Planta de Ignición Nacional. El gobierno dice que el objetivo del programa es asegurar que las armas nucleares mantengan su seguridad y fiabilidad, pese a la ausencia de ensayos desde 1992. Cochran replica, sin embargo, que con el programa se pretende que los Estados Unidos dispongan de la capacidad de diseñar nuevas armas nucleares más eficaces. El DOE pone gran empeño en desarrollar supercomputadores 100.000 veces más rápidos que los actuales. Estos aparatos, en el sentir de Cochran, podrán simular el "paquete físico" de una ojiva con una precisión sin precedentes. El dinero gastado cada año en el programa, entre 4500 y 5000 millones de dólares, sobrepasa con creces lo necesario para la tarea relativamente simple de mantener la seguridad y fiabilidad del arsenal actual, asegura Cochran.

De estar Cochran en lo cierto, el programa de custodia del arsenal cuadra bastante mal con la política declarada del gobierno, que es la de no desarrollar nuevas armas nucleares. Al menos hay ya una nueva arma, señala Cochran. La reciente cabeza nuclear B61-11, que es capaz de penetrar en el suelo, posee cruciales ventajas militares frente a su predecesora no penetrante B61-7. Sin embargo, el DOE, con un artificio semántico, dice que la B61-11 es una mera modificación.

El plan de custodia del arsenal ha crecido como la espuma a causa de la presión política ejercida por la industria de guerra, acusa Cochran. Así que no tiene reparos para enfrentarse al programa con una denuncia que se acoge a la Ley Nacional de Política Ambiental, que requiere un estudio completo de impacto ambiental para los grandes proyectos. Con la misma acción se amenaza la falta de un estudio de impacto ambiental en los otros laboratorios de armamento del DOE.

Cochran hace sus deberes. La mitad del suelo de su despacho está ocupado por 40 gruesas carpetas de anillas que agavillan 1600 documentos sobre los estudios medioambientales del DOE. Este guerrero de la información dice que los ha examinado todos. Y que él y sus colegas aún tienen más munición. Se opone sobre todo al comercio de material susceptible de emplearse en bombas, como el plutonio y el uranio enriquecido.



Los emplazamientos de misiles antibalísticos en los alrededores de Moscú probablemente serían de los primeros blancos que se destruyeran en un ataque nuclear contra Rusia

En 1986 salió en titulares cuando despachó 20 toneladas de equipos para medir la actividad sísmica en Kazajistán, principal campo de pruebas nucleares de la Unión Soviética, al objeto de registrar las ondas de choque producidas por los ensayos. Luego, los soviéticos se presentaron en Nevada para controlar los experimentos. El proyecto fue sorprendente por el grado de cooperación que ofrecieron los soviéticos. Se puso en marcha cuando von Hippel organizó un encuentro en el que Cochran presentó su plan a Evgeny P. Velijov, vicepresidente de la Academia Soviética de Ciencias. Velijov, cercano al entonces presidente Mijail Gorbachev, "se dio cuenta inmediatamente de las implicaciones políticas", cuenta Cochran.

El proyecto mostró que era factible utilizar los registros sísmicos para verificar el tratado de prohibición de bajo umbral. Luego lo asumió el gobierno y Cochran fue galardonado con el Premio Szilard de la Sociedad Americana de Física. La Asociación Americana para el Avance de la Ciencia también reconoció el proyecto y le concedió al Consejo para la Defensa de los Recursos Naturales el Premio a la Libertad y Responsabilidad Científicas.

A finales de los ochenta Cochran dirigió otro equipo americano que utilizó detectores de radiación en las proximidades de una cabeza nuclear armada, en un crucero soviético, para demostrar que los detectores podían verificar los límites de los controles de armamento. En su visita por la Unión Soviética en el avión privado del ministro de Defensa, Cochran también acompañó a la delegación del Congreso a instalaciones militares de interés estratégico, como el radar de alerta precoz de Krasnoyarsk, en Siberia.

Ahora Cochran intenta la misma táctica con China. Ha entablado "buenas relaciones" con representantes del programa nuclear, entre ellos con Hu Side, director de la Academia de Ingeniería Física, y su consejero Du Xiangwan. Ambos "están a favor del control de armamento", insiste. Cada dos años un grupo internacional de físicos se reúne con expertos en armas chinos para tratar sobre el control de armas y la política medioambiental. Dice Cochran que el gobierno estadounidense nunca le ha pedido obtener una información específica, pero que ha sido "interrogado informalmente" tras alguna visita al extranjero.

Ante el ejemplo de Cochran, los ecologistas comienzan a entender que, para que se les tome en serio, deben dominar los entresijos técnicos y científicos de los temas. Para los que quieran emular su trayectoria, Cochran repite un consejo: "Di siempre la verdad. Sé cauto en tus declaraciones. Y habla con tus enemigos."

Convergencias de antaño

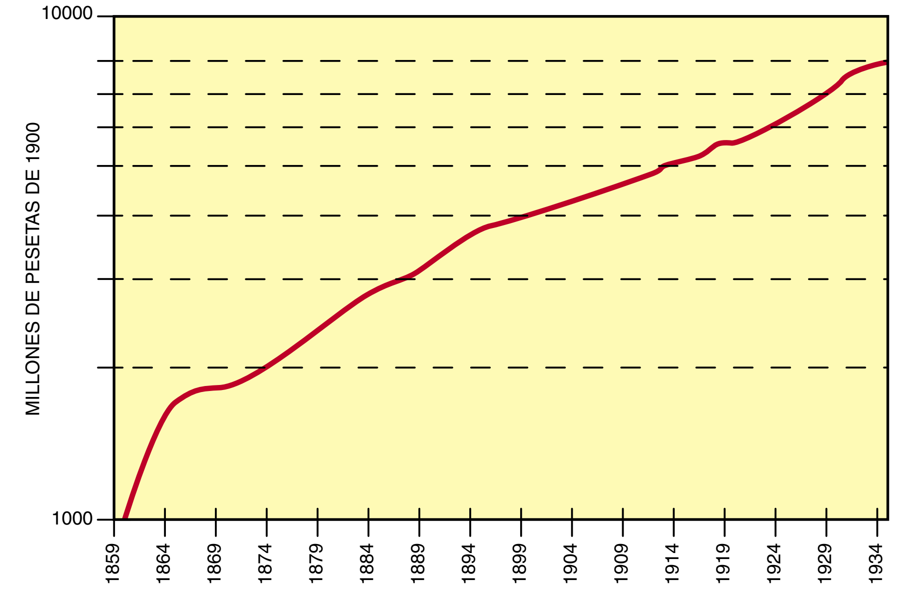
Infraestructuras y desarrollo económico

Durante el último medio siglo se ha producido un movimiento constante de aproximación entre las economías que hoy forman la Unión Europea. Tan sólo algunas escasas y pasajeras vacilaciones han enturbiado un proceso que ha sido intenso y persistente. El fenómeno en sí mismo ha constituido la mejor confirmación de la teoría del crecimiento neoclásica, según la cual, cuando un conjunto de economías con rasgos estructurales relativamente similares inicia un proceso de integración, es de esperar un movimiento de convergencia entre sus niveles de renta per cápita.

Sin embargo, la experiencia de este pasado inmediato contrasta con momentos más remotos en el tiempo, en los cuales el incremento de intercambios entre las economías europeas no se tradujo en una aproximación mutua. A lo largo del medio siglo anterior a la Primera Guerra Mundial, a pesar de la profundización en sus relaciones, las economías europeas adolecieron de una marcada incapacidad para converger entre sí. La economía española, en concreto, mantuvo inalterada su distancia relativa con respecto a los países más desarrollados de Europa y fue incapaz de adelantarse en la carrera del crecimiento.

A diferencia de la situación actual, las economías europeas de finales del siglo XIX tuvieron dificultades para converger porque sus divergencias estructurales pesaban más que sus similitudes. En otras palabras, las economías más atrasadas carecían de una serie de recursos esenciales para la convergencia. La identificación de estos recursos es imprescindible para conocer las causas del "fracaso" de la economía española del período y para entender mejor por qué su acercamiento a las economías centrales de la actual Unión tuvo que esperar hasta la segunda mitad de la presente centuria.

El stock de infraestructuras es uno de estos factores esenciales de crecimiento. Las redes de transporte de personas, mercancías, información, agua o energía son imprescindibles para lograr la especialización productiva de las regiones y para permitir el aprovechamiento de economías de escala. El análisis de la dinámica de construcción del stock de infraestructuras español y de sus carencias ofrece algunas pistas sobre si se han de buscar las razones del deficiente comportamiento de nuestra economía en este o en otros ámbitos.



1. Stock de infraestructuras de la economía española

En el proceso de construcción se distinguen dos etapas a lo largo del período que va desde mediados del siglo XIX hasta la guerra civil. En la primera de ellas, prolongada aproximadamente hasta 1900, el stock de infraestructuras español creció a tasas considerables: entre 1860 y 1900, la ratio entre su valor y el PIB pasó del 15 % al 40 %, porcentaje este último típico de economías contemporáneas. La segunda mitad del siglo XIX es, en consecuencia, el período de fundación del stock de infraestructuras español. A lo largo de ella, se llevó a cabo la construcción de los activos más costosos y básicos de ese stock: las grandes redes de transporte (carreteras del Estado y ferrocarriles de vía ancha) que conectaban entre sí los territorios peninsulares. Estas redes constituían uno de los requisitos fundamentales del crecimiento económico español, ya que eran la base de una especialización productiva de las distintas regiones que permitiría el aprovechamiento de economías de escala y aglomeración. El proceso constitutivo de que hablamos se hallaba a finales de la pasada centuria muy avanzado y bien adaptado al nivel de desarrollo económico español (según podría deducirse de esa ratio del 40 %) y, teóricamente, tuvo que generar nuevas e importantísimas oportunidades de crecimiento para la economía española.

A partir de 1900 la dinámica constructiva cambió. El stock comenzó a crecer a tasas más moderadas y la ratio entre el stock y el PIB se mantuvo estable en torno al 40 % durante todo el primer tercio del siglo XX. Por otro lado, en la inversión comenzaron a pesar activos como las redes de transporte secundarias o las redes de agua y energía. Aparentemente, una vez alcanzado cierto umbral y cubiertas las necesidades más acuciantes en cuanto a los activos esenciales (grandes redes interregionales), la inversión se limitó a responder a las demandas coyunturales que le iba planteando el crecimiento de la economía española, con el fin de evitar

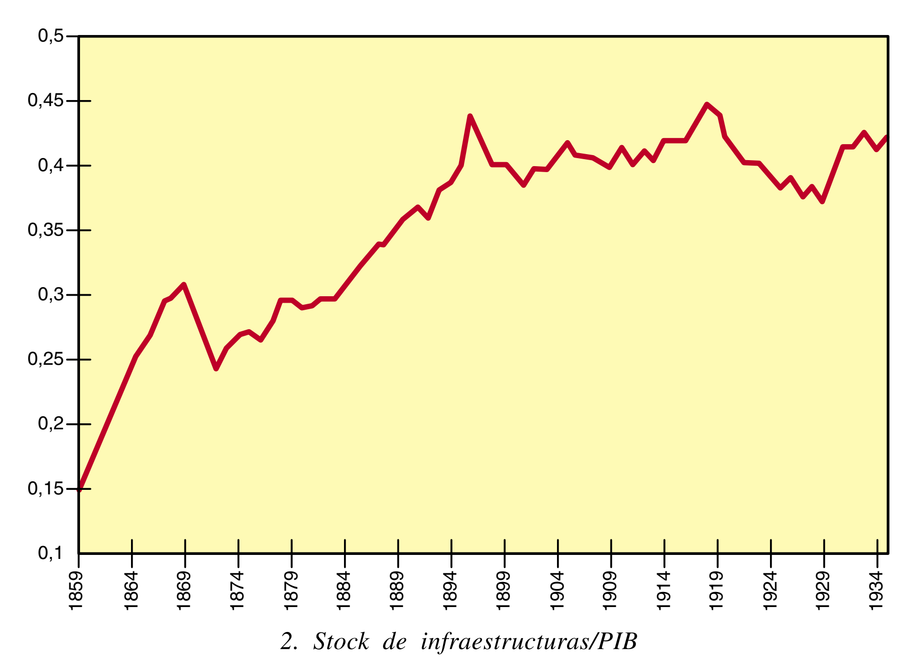
que se produjesen estrangulamientos en su proceso de crecimiento. Un objetivo que parece haberse cubierto con relativo éxito, dado que el stock no se rezagó en todo el período con respecto al PIB.

Así pues, la construcción del stock de infraestructuras parece haberse realizado a buen ritmo, adaptándose pronto a las necesidades de la economía. Ello llevaría a rechazar que las infraestructuras tuvieran alguna responsabilidad en la incapacidad española para converger. Sin embargo, el análisis econométrico de la relación entre las series de stock y PIB tan sólo confirma parcialmente estas hipótesis.

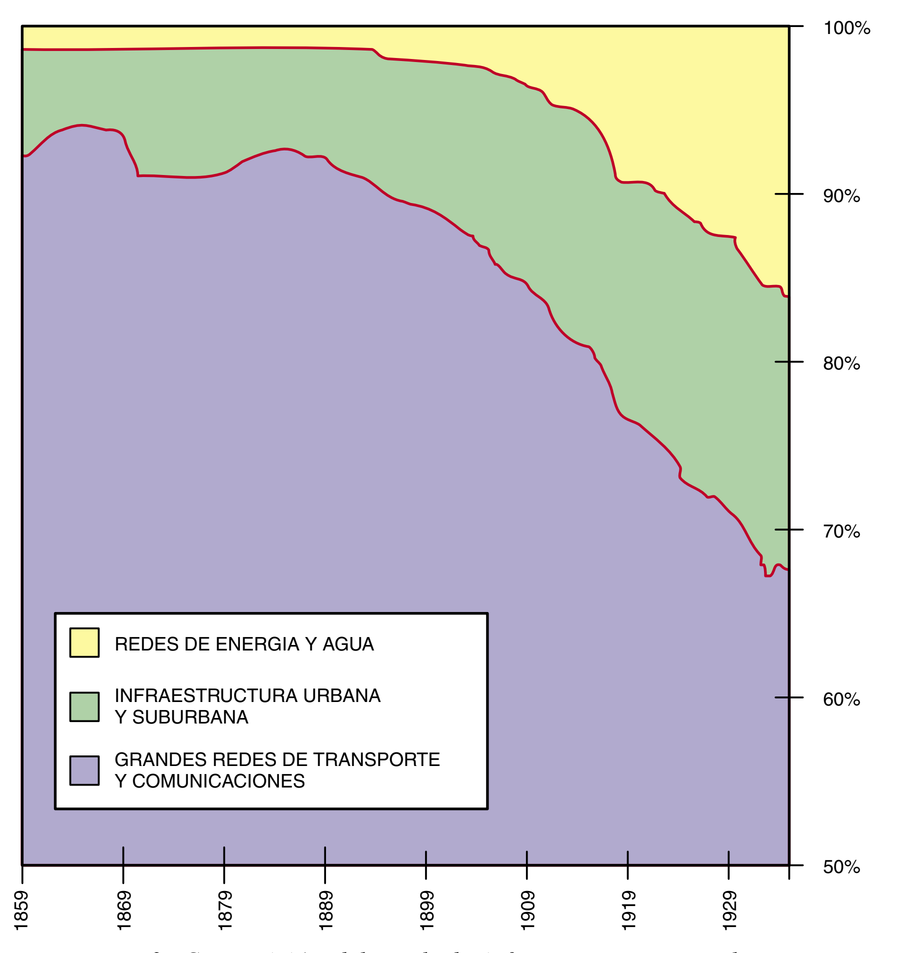
El estudio de las relaciones de causalidad entre las series de stock de infraestructuras y PIB (única aproximación factible dada la imposibilidad de estimar funciones de producción para el período) ofrece unos resultados inesperados. Mientras que en el primer tercio del siglo XX se percibe una relación de influencia del PIB sobre el stock, durante la segunda mitad del XIX hay una total desconexión entre ambas series. Es decir, si bien el análisis confirma la adaptación del stock a las necesidades de la economía después de 1900, no refleja las nuevas oportunidades de crecimiento que tuvo que suponer la construcción de las redes fundamentales antes de esa fecha.

Esta anomalía exige plantear hipótesis explicativas diferentes. La falta de relación entre la construcción del stock y el PIB antes de 1900 pudo deberse, en primer lugar, a la propia concentración de la inversión en las redes de transporte fundamentales, descuidando en exceso unas redes secundarias que eran, sin embargo, igualmente esenciales para lograr la integración económica del país. La desconexión pudo deberse también a la propia pobreza de la población española: un nivel de renta ínfimo y una economía de subsistencia generalizada que impidieran a la mayoría de la población beneficiarse de las oportunidades creadas por las nuevas redes. Y, en tercer lugar, la distribución territorial de la inversión, guiada más por criterios de orden público o electorales que por consideraciones económicas, pudo no ser la más adecuada para el nivel de desarrollo relativo de cada una de las regiones españolas. En este sentido, parte del stock podía estar siendo infrautilizado en algunas regiones, mientras que en otras áreas podían estarse produciendo estrangulamientos. Esta última hipótesis, en concreto, se ha visto confirmada por la evidencia. Los análisis iniciales son indicativos de una distribución ineficiente de las infraestructuras en el espacio, que se mantuvo muy estable a lo largo de todo el período.

De este modo, a pesar de haberse aplicado un volumen de inversión en principio suficiente, el magro rendimiento de las redes o el propio nivel de pobreza de la economía española parecen haber impedido un aprovechamiento eficaz de los nuevos



2. Stock de infraestructuras/PIB



3. Composición del stock de infraestructura español

activos y permiten explicar una parte de la divergencia española durante el período de estudio.

ALFONSO HERRANZ LONCÁN
Departamento de Historia
e Instituciones Económicas
Universidad de Barcelona

La muerte celular

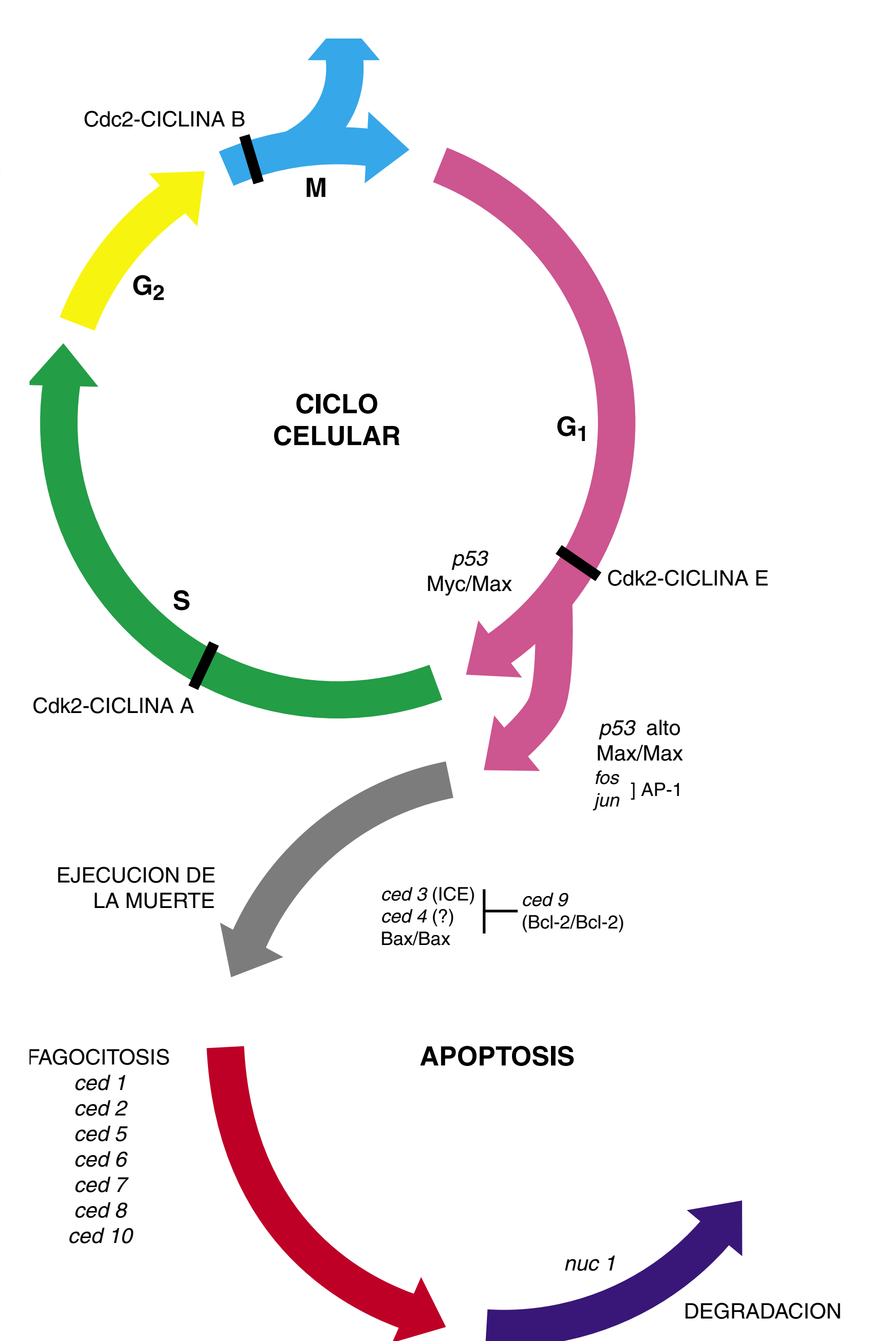
Entre la exigencia y la fatalidad

Llamamos apoptosis a la muerte fisiológica de las células. Aunque el término se considera sinónimo de muerte celular programada, la desaparición de muchas células no está prevista, sino que resulta de cambios impredecibles en su entorno. Durante la apoptosis, el núcleo celular se condensa, se compacta la cromatina y la célula se encoge. Esta, además, pierde sus lazos de unión con otras y se forman protuberancias en la superficie al desorganizarse el citoesqueleto.

El proceso de destrucción no termina ahí. El retículo endoplasmático se dilata y las cisternas que forma se fusionan con porciones de membrana plasmática (la que ciñe a la célula). La membrana nuclear se invagina, el núcleo se fragmenta y la célula se desintegra en trozos rodeados de membrana que pueden contener fragmentos de cromatina, mitocondrias u otros orgánulos.

Los fragmentos resultantes, convertidos en cuerpos extraños (apoptóticos), acaban fagocitados por células especializadas, los macrófagos. De ese modo, la apoptosis pasa inadvertida y no desencadena ningún mecanismo de defensa (la inflamación, por ejemplo) al no derramar los contenidos celulares.

Los organismos pluricelulares recurren a la apoptosis en muchos procesos fisiológicos y patológicos. La eliminación de linfocitos B y T autorreactivos y de timocitos inmaduros, trío de células que intervienen en la formación del sistema inmunitario, se realiza por apoptosis. Este caso, como otros, muestra el carácter altruista de la apoptosis, donde la célula se suicida en beneficio del organismo, evitando con ello la producción de nuevas partículas víricas, la aparición de enfermedades autoinmunitarias o la replicación del ADN alterado.



Relaciones entre el ciclo celular y la apoptosis. Se indican los productos génicos que controlan la continuación del ciclo celular, o, por el contrario, el comienzo de la apoptosis y su ejecución. Los productos ced-9 *y* bcl-2 *inhiben la ejecución de la apoptosis*

Queda mucho camino por recorrer hasta llegar al conocimiento cabal de la bioquímica de la apoptosis, que, para mayor complicación, varía de unas células a otras. No obstante, así como sabemos que la condensación de la cromatina constituye su primer indicio morfológico, se ha identificado su sello bioquímico universal: la fragmentación internucleosómica del ADN en múltiplos de 180-200 pares de bases produce, en electroforesis en gel de agarosa, un patrón "en escalera".

Antes de verse los cuerpos apoptóticos aparecen fragmentos de ADN de 300 pares de kilobases (Kpb) y luego de 50 Kpb. La formación de grandes fragmentos de ADN sería la señal irreversible que conduce a la apoptosis, mientras que la rotura internucleosómica sería un suceso posterior.

Entre las enzimas responsables de la fragmentación, las endonucleasas más probables son ADNasa I, NUC18 y NUC23, dependientes de Ca^{2+} y Mg^{2+} y de p*H* óptimo neutro. Se inhiben en presencia de iones de zinc.

Inducida la apoptosis, aumenta la concentración de Ca^{2+} citosólico. Ese incremento pone en operación, además de fosfolipasas, endonucleasas, varias proteínas más: la enzima que activa la interleuquina (ICE), la calpaína que actúa sobre el citoesqueleto, la transglutaminasa que entrecruza proteínas en una densa malla citosólica e impide el vertido de contenidos celulares, y la calmodulina que modula la actividad de otras proteínas. Aunque el aumento del Ca^{2+} citosólico desencadena la apoptosis en diversas células, en otras el efecto es opuesto y podría deberse al producto del gen antiapoptosis *bcl2*, que retiene el Ca^{2+} en el retículo endoplasmático.

En la transmisión de las señales desde la membrana al citosol y al núcleo participan tres enzimas: quinasas C, quinasas de tirosina y quinasas A. La activación de las quinasas C, quinasas de tirosina y proteína Ras de membrana (diana de estas últimas), convergen en una sola vía mediada por otro tipo de quinasa. Esta última activa a diversos factores de transcripción que participan en el control del ciclo celular y en la expresión de genes directamente implicados en la apoptosis.

Recientemente se ha descubierto una nueva vía de transducción de señales en la que interviene la ceramida como segundo mensajero. Esta vía se pone en funcionamiento por el factor de necrosis tumoral, el interferón y la interleucina-1 que actúan como señales, y de nuevo se activan enzimas y factores de transcripción relacionados con la apoptosis.

Las distintas vías de traducción de señales cooperan en la expresión de diversos genes que activan el programa mortal, sintetizando o posibilitando la operación de la maquinaria apoptótica. Entre los genes que favorecen la apoptosis están *p53*, *c-myc*, *fos* y *jun*. El gen *p*53, un supresor de tumores, favorece la apoptosis de células dañadas por radiaciones ionizantes o mutágenos, e impide que las células con ADN alterado progresen en el ciclo celular deteniéndolas al final de la fase G1, por lo que se le ha denominado "guardián del genoma". Entre los genes que frenan la apoptosis se encuentra el protooncogén *bcl2*. La proteína Bcl-2 está unida a membranas en tejidos muy proliferantes. Diversas proteínas, como Bax, están relacionadas con el gen *bcl2*. *Bcl2* y Bax se dimerizan entre ellas o consigo mismas provocando o suprimiendo la apoptosis dependiendo del dímero formado.

La decisión de proliferar o entrar en la vía terminal de apoptosis se toma en el punto de control situado al final de la fase G1 del ciclo celular. Niveles normales de las proteínas p53 y Myc favorecen la entrada en fase S. Cuando los niveles de p53 son muy elevados, la célula no puede reparar los daños del ADN y se sobreexpresan los factores de transcripción que hacen que la célula entre en apoptosis. La fagocitosis y la fase terminal de degradación de los cuerpos apoptóticos están favorecidas por otros ocho genes en *C. elegans*, aunque aún no se conocen sus homólogos en vertebrados.

Mutaciones o cambios en la expresión de estos genes pueden dar lugar a diversas enfermedades hoy incurables, como cáncer, sida, enfermedades neurodegenerativas y autoinmunitarias, bien por una deficiente apoptosis de células dañadas o por desaparición de células que deberían sobrevivir. La intensa investigación que se está realizando y el conocimiento cada día más profundo de los mecanismos que conducen al suicidio celular abren una puerta a la esperanza en la terapia de estas graves patologías.

CONCEPCIÓN GARCÍA ALFONSO
y JUAN LÓPEZ BAREA
Departamento de Bioquímica
y Biología Molecular, Facultad
de Veterinaria de Córdoba

Vida en las ciudades

Contaminación acústica

Vivimos en un mundo de sonidos. Nuestro sistema auditivo está siempre abierto, lo que implica una recepción continua de estímulos y de informaciones sonoras de las que no podemos sustraernos. Mediante la emisión y recepción de estímulos sonoros, mantenemos una constante interacción con el medio. Más aún, gran parte de nuestra experiencia está relacionada con el sonido.

A lo largo de la historia, el paisaje sonoro ha experimentado múltiples transformaciones. Aunque cada época



1. El apantallamiento de vías de circulación es una estrategia ampliamente utilizada para atenuar el ruido de tráfico y disminuir su impacto en la población. Estas medidas correctoras, en relación al control del ruido, aunque necesarias no resultan suficientes. La adopción de planteamientos previsores debería contemplarse como el instrumento más eficaz para prevenir el ruido en las áreas urbanas, lo que implica la toma en consideración del ambiente sonoro en las políticas de planificación y diseño urbano

y cada civilización tienen su propia sonoridad, en el pasado el paisaje sonoro de nuestras comunidades estaba conformado por sonidos naturales del medio y por los ligados a actividades del hombre. Estos segundos cobraron especial auge con la revolución industrial.

En la sociedad preindustrial había cierta armonía entre sonidos naturales y antropogénicos. En la industrial, predominan los sonidos mecánicos sobre los sociales y naturales; se trata, además, de sonidos de elevada intensidad con predominio de bajas frecuencias. El fondo sonoro de nuestros días es monótono y continuo con fluctuaciones lentas y difíciles de identificar y localizar.

El sonido, variación de la presión del aire que puede ser detectada por el oído humano, suele describirse mediante ciertos parámetros físicos, en particular, la intensidad y la frecuencia. Pero estos parámetros no resultan suficientes para explicar la variabilidad de la molestia sentida ante un mismo nivel de ruido, ni la diversidad de efectos psicológicos y fisiológicos. Para Pascal Amphoux, del Centro de Investigaciones sobre el Espacio Sonoro de Grenoble, la valoración del sonido depende no tanto de lo que éste sea "en sí" (características físicas objetivas), cuanto de lo que dicho ambiente representa para uno. Es decir, a las características o rasgos objetivos se sobrepone la percepción del oyente (variables subjetivas).

La contaminación acústica, una de las formas de agresión principales contra el medio, ha roto la armonía de antaño, transformándola en una cacofonía en la que los sonidos más dispares se entremezclan. En esta situación, al hombre le cuesta discriminar las señales sonoras que en su interacción con el medio desea o necesita escuchar, lo que provoca un estado de tensión crónica.

El progreso técnico, la proliferación de los medios de transporte, el hacinamiento y el crecimiento urbano son factores que han contribuido a la degradación acústica del medio y al deterioro de las relaciones entre el hombre y su entorno. Por lo que concierne al medio urbano, el ruido provocado por el tráfico es el factor más importante. En particular, la circulación rodada constituye el sonido dominante; se considera que en las grandes ciudades el 80 % de los ruidos provienen del tráfico. Por culpa del tráfico, en los países de la Unión Europea cerca de un 25 % de la población se halla expuesta a un nivel de ruido superior a los 65 decibelios (dBA). El nivel de 65 dBA cifra el límite superior de tolerancia.

En nuestro país, la relación entre población y parque de vehículos ha variado substancialmente durante las últimas décadas. Mientras que en 1965 había un vehículo por cada cuarenta personas, en 1992 la relación era de un vehículo cada tres. Este aumento espectacular, unido al trazado de nuestras ciudades (calles estrechas y carencia de espacios abiertos), ha incidido significativamente en el incremento de los niveles de ruido en el medio urbano. Se estima que, en España, la situación respecto al ruido puede valorarse como grave o muy grave en el 48 % de los municipios entre 100.000 y 500.000 habitantes, elevándose este porcentaje al 67 % en las ciudades grandes (< 500.000 habitantes). Los mapas acústicos, cuyo objetivo es la medida y análisis de los niveles sonoros de múltiples puntos de la ciudad, nos revelan que el nivel de ruido en las grandes ciudades supera los 70 decibelios de nivel equivalente (dBA leq), siendo este nivel ligeramente inferior en las ciudades medias.

Hemos estudiado la incidencia negativa de la contaminación acústica en las ciudades españoles y el rechazo de la misma por los habitantes. La saturación del espacio por el continuo zumbido del tráfico produce una sobrecarga de estimulación que el hombre es incapaz de procesar. El ambiente sonoro se transforma en ruido y, por consiguiente, en motivo

de estrés. Esta respuesta emocional define la dificultad o imposibilidad de interacción con estos contextos, siendo valorados por la población como espacios de paso o huida.

Por el contrario, los contextos sonoros situados entre los grandes ejes de circulación o apartados de los mismos (determinadas plazas, barrios, parques) en los que el ruido de tráfico no constituye una fuente dominante sino que se combina de forma equilibrada con otros sonidos presentes en el medio (naturales, sociales) se valoran como espacios sonoros no opresivos.

Contexto y sonido son dos variables estrechamente relacionadas. El sonido define y cualifica el tiempo y el espacio y, a la vez, refleja y mediatiza las relaciones del hombre con el entorno. El problema de la contaminación sonora no se solucionará hasta que en la planificación y diseño de la ciudad no se introduzca la variable acústica al mismo nivel que otro tipo de variables. Hasta el momento las actuaciones llevadas a cabo en relación al ruido son fundamentalmente de carácter defensivo (instalación de pantallas, delimitación de zonas de ruido, definición de niveles de ruido aceptables y otros) o bien se hallan centradas en el diseño de obras arquitectónicas de carácter preferentemente monumental (teatros, salas de escucha, etcétera), no habiéndose promovido, desde una visión preventiva, una integración de este factor del medio en la planificación urbana.

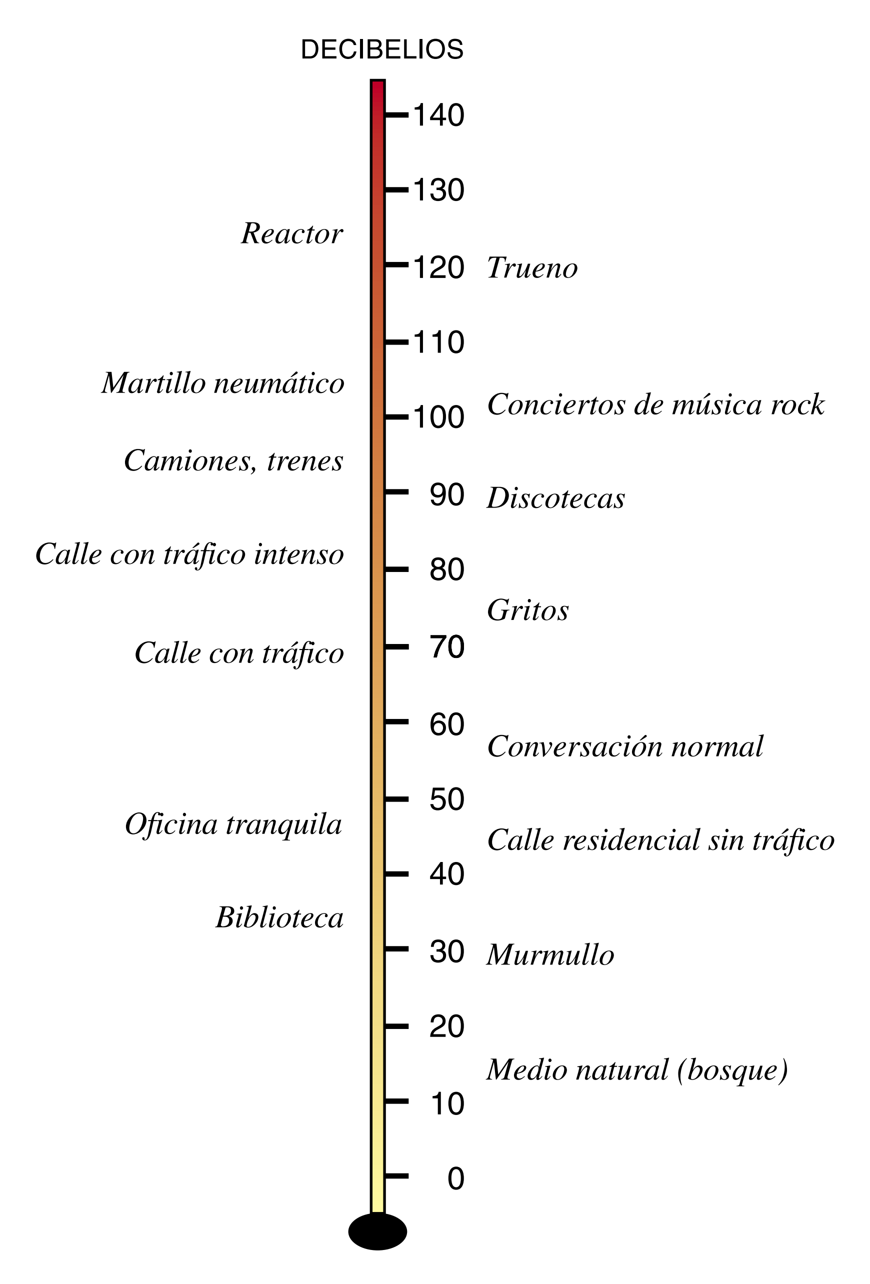
Cuando se aborda el análisis de la respuesta de molestia ante el ruido, el nivel de ruido sólo explica un pequeño porcentaje (> 20 %) de la variabilidad de la respuesta ante el mismo. La valoración subjetiva, junto con los parámetros físicos, determinará que un ambiente sonoro se juzgue ruidoso, convirtiéndose en este caso en un factor de estrés, o se considere sonido, cuando su percepción es aceptada o deseada. Así pues, la diferencia entre ruido y señal no depende estrictamente de los parámetros físicos objetivos del sonido. Un mismo sonido puede producir reacciones muy dispares.

Los sonidos de elevada intensidad y con componentes de altas o bajas frecuencias (agudos o graves) son los que más agreden el oído humano. Por lo general, los ruidos intermitentes son más negativos que los continuos o estables y, si la intermitencia es aperiódica (impredecible), su impacto negativo todavía es mayor.

En una investigación que realizamos sobre la respuesta subjetiva al ruido de tráfico con sujetos del área metropolitana de Madrid expuestos a un amplio rango de niveles (55-80 dBA leq), se comprobó que la sensibilidad al ruido, en mayor medida que el nivel sonoro, era el predictor principal de la respuesta. No obstante, ambas variables sólo explican un pequeño porcentaje de la variabilidad en el grado de molestia (21 %), existiendo un alto porcentaje (77,5 %) de la varianza que vendría explicada por otros factores de orden psicológico.

Sheldon Cohen, de la Universidad de Pittsburgh, observó que los niños de las escuelas ubicadas en las proximidades del aeropuerto de Los Angeles y expuestas a elevados niveles de ruido, con picos de intensidad sonora que podían alcanzar los 95 dBA manifestaban mayor indefensión en comparación con los de escuelas no expuestas al ruido. David Glass, de la Universidad de Nueva York, descubrió que los efectos psicológicos adversos de un ruido impredecible disminuían cuando a los sujetos se les daba la posibilidad de hacer cesar el ruido oprimiendo un botón, independientemente de que esta conducta se realizase.

El ruido y sus efectos en la salud y en la conducta del hombre han



2. Intensidad del ruido producido por diversas fuentes ambientales

sido objeto de intensa investigación en años recientes. Tales efectos podemos agruparlos en dos categorías. La primera comprende los que comportan una relación causal directa entre la exposición al ruido y el deterioro de la salud. Este es el caso de las pérdidas de audición inducidas por exposiciones breves a sonidos muy intensos (< 140 dBA) o bien exposiciones prolongadas a ruidos mayores de 85 dBA. La segunda categoría corresponde a los efectos vinculados a una reacción de estrés.

Desde hace tiempo se sabe que las condiciones ambientales de ruido de determinadas profesiones provocan hipoacusia. Estas pérdidas aparecen primero a 4000 hertz, extendiéndose luego a las demás frecuencias y especialmente a las más bajas (3000 a 500 hertz), fundamentales para la comprensión del habla. Ya Michel Montaigne en 1580 citaba casos de traumatismo acústico producido por armas de fuego. Actualmente, el riesgo de pérdida de audición por ruido ocupacional se halla bastante controlado debido a las medidas preventivas adoptadas, tanto técnicas (protección del ruido en la fuente y reducción de las emisiones sonoras) como sanitarias (protección acústica de los trabajadores y control de la audición). Lo que no obsta para que la sordera debida al ruido sigue siendo una de las enfermedades profesionales más frecuentes.

Annie Moch, de la Universidad de París, observó, en un estudio comparado entre niños que asistían a escuelas atenuadas y no atenuadas próximas al aeropuerto de París, una capacidad de atención y de discriminación auditiva significativamente menor en los niños de las escuelas no atenuadas, es decir, expuestas a mayores niveles de ruido. A similares resultados llegó Sheldon Cohen al comparar, en función del nivel de la vivienda en relación a una carretera, la capacidad de discriminación auditiva de 54 niños que habitaban en un edificio de 32 pisos expuesto a intenso ruido de tráfico. Los niños que vivían en los pisos más bajos (más próximos a la carretera) mostraron una capacidad de discriminación auditiva significativamente menor.

Esta menor atención a las señales auditivas o "sordera psicológica" se originaría como una consecuencia de la estrategia seguida por los niños de desintonizar del ambiente de ruido. Esta tendencia a ignorar el ruido se generaliza con el tiempo y, con prolongados tiempos de exposición, se extiende a cualquier estímulo sonoro, tanto los aversivos (ruido) como los informativos y relevantes, como la palabra.

El ruido, al actuar como agente de estrés, desencadena un conjunto de reacciones fisiológicas (alteraciones hormonales, cardiovasculares y otras), psicológicas (anomalías en la atención, alteraciones del sueño, ansiedad y molestia) y conductuales (deterioro del clima social, irritabilidad o agresividad).

La molestia debida al ruido puede venir acompañada de dolor de cabeza, tensión, irritabilidad, sentimiento de indefensión y otras manifestaciones de una reacción de estrés. Esta reacción se mezcla con las interferencias del ruido en diferentes actividades, siendo el sueño, la percepción de la palabra y la atención las más entorpecidas. Se altera el sueño a partir de exposiciones a un ruido ambiental de 45 dBA. Asimismo, la exposición al ruido durante la noche puede producir efectos secundarios o postefectos, verbigracia, reducción de la calidad del sueño, sensación de fatiga, disminución del humor o bienestar y caída del rendimiento.

Otro efecto importante del ruido es la interferencia en la comunicación. La emisión de la voz para la mayoría de los sujetos se sitúa en los 55 dBA. Cuando el nivel de ruido se eleva 10 dBA por encima del nivel de emisión de la voz se produce un enmascaramiento que dificulta la comprensión de la palabra. Este efecto tiene una incidencia especialmente negativa en aquellas actividades en las que la percepción de la palabra es parte esencial de las mismas, como la enseñanza.

De acuerdo con nuestro trabajo en dos escuelas próximas al aeropuerto de Torrejón (Madrid), expuestas a dos focos de contaminación acústica, ruido de aviones (con niveles de pico de 103 dBA) y de tráfico (65-70 dBA leq), se observa que la interferencia en la comunicación constituía el principal entorpecimiento de la actividad escolar. Esta situación es especialmente crítica en las primeras etapas de la enseñanza, cuando el lenguaje resulta menos redundante, debido a que el vocabulario infantil es mucho más limitado y no han adquirido un dominio gramatical y sintáctico que les permita suplir las palabras que no han oído.

Además, las condiciones adversas en las que se impartía la enseñanza suponían un coste psicológico para profesores y alumnos que se traducía

en estados de tensión e irritación que conducían al cansancio y agotamiento al finalizar la jornada escolar. Los efectos del ruido sobre el rendimiento dependen de las características del ruido (intensidad, espectro, duración, continuidad o intermitencia, etc.) y de la tarea (grado de complejidad, duración de la misma, familiaridad con el trabajo, etc.). En relación a las características del ruido, se puede predecir que los ruidos intensos (< 90 dBA) así como los intermitentes e impredecibles afectan en mayor medida la ejecución que los de menor intensidad, continuos o regulares.

En ambientes laborales ruidosos se produce un incremento significativo del número de accidentes, atribuible a la disminución de la capacidad de atención y concentración. Diversas teorías explican los efectos del ruido sobre el rendimiento. La teoría de la activación, o ley de Yerkes-Dodson, pone en relación la activación que provoca el ruido, el rendimiento en la tarea y la dificultad de la misma. Es un hecho bien conocido que el ruido tiene la capacidad de elevar el estado general de alerta o reactividad de la persona, siendo las diferencias individuales en activación las que determinan el grado de tolerancia ante un determinado nivel de ruido y, a su vez, configura los efectos sobre el rendimiento. Así, por ejemplo, en tareas sencillas y monótonas que no exigen rapidez o gran esfuerzo, y, por tanto, no suponen un nivel de activación elevado, la introducción de una estimulación adicional, como es el ruido, favorece la ejecución al ayudar a mantener un nivel de activación óptimo. Sin embargo, en tareas complejas, que demandan una gran concentración, la estimulación del ruido incrementa el nivel de activación por encima del valor óptimo, produciendo un deterioro en el rendimiento.

La teoría de la sobrecarga de información considera que el ruido, al incrementar el número de informaciones recibidas del ambiente, produciría un efecto de sobrecarga en la atención del sujeto. Las consecuencias de este efecto de sobrecarga se traduciría en un incremento de la fatiga física y psíquica.

Los entornos ruidosos inciden negativamente en la conducta social. De acuerdo con las investigaciones realizadas por Kenneth Mathews y Lance Canon, de la Universidad de New Hamsphire, y por Richard Page, de la Universidad de Wright, los sujetos expuestos a un ruido intenso se muestran menos dispuestos a ayudar a los demás. El ruido disminuye la sensibilidad y el interés hacia los otros.

ISABEL LÓPEZ BARRIO
Departamento de acústica ambiental del Instituto de Acústica (CSIC), Madrid

Herramientas biológicas

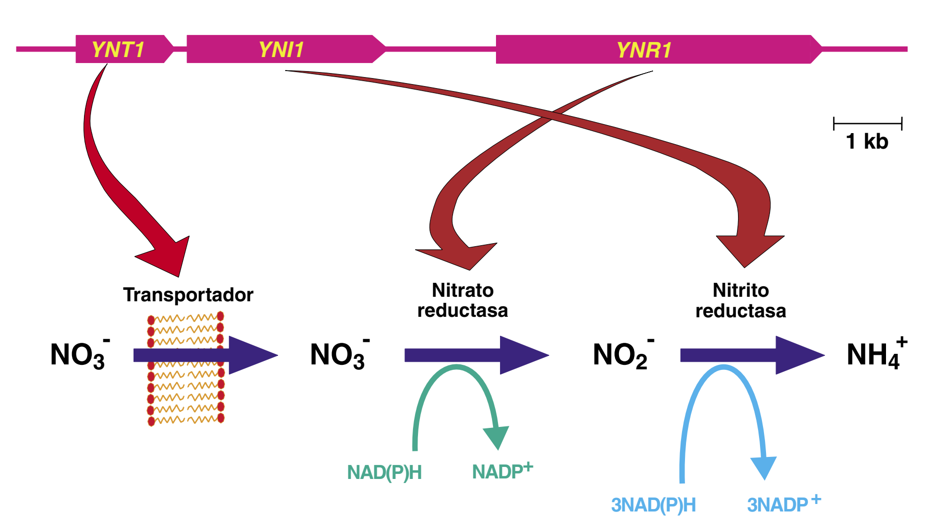
Levaduras

La levadura ha desempeñado un papel muy importante en el desarrollo de la bioquímica. Si consideramos que se han descrito unas 600 especies de levaduras, resulta a primera vista impreciso hablar de "levadura" en singular. Y en realidad lo es. Sucede, sin embargo, que ha sido una especie, *Saccharomyces cerevisiae*, la que por circunstancias históricas estuvo ligada al nacimiento y crecimiento de la bioquímica, de modo que "levadura" y *S. cerevisiae* han pasado a ser sinónimos.

Andando el tiempo, los estudios sobre ciclo celular incorporaron otra levadura a los laboratorios: *Schizosaccharomyces pombe*. Por su forma de dividirse se la denomina levadura de fisión.

Una serie de desarrollos recientes en el campo sanitario o biotecnológico ha traído al quehacer científico otras especies de levaduras. En el argot reciben el nombre común de "no convencionales". Esta calificación no informa sobre sus características taxonómicas o fisiológicas, lo único que dice es que son distintas de las habituales *S. cerevisiae* o *Schiz. pombe*. La verdad es que hasta hace poco resultaba más difícil trabajar en el laboratorio con aquellas levaduras que con la clásica *S. cerevisiae*. Por un lado, el ciclo vital de las primeras no se prestaba bien a estudios genéticos clásicos; por otro, las herramientas necesarias para aplicar las técnicas de ADN recombinante no estaban bien desarrolladas.

Desde el punto de vista sanitario, *Candida albicans* es la especie más importante. Esta levadura que existe como comensal inocuo en toda la población, se convierte en un grave peligro en personas inmunodeprimidas. Pese al empeño puesto en ello, no se poseen todavía antifúngicos eficaces para el tratamiento de infecciones sistémicas de *C. albicans*. Por ser esta levadura un organismo eucariótico, lo mismo que su hospedador, la investigación de fármacos que actúen contra ella resulta muy difícil. Añádase a ello que *C. albicans* es diploide y no tiene fase haploide conocida, lo que impide abordarla desde un enfoque clásico de la genética.



En el laboratorio de uno de los autores (J. M. Siverio) se estudian los mecanismos de asimilación de nitrato en H. polymorpha. *Esta levadura, a diferencia de las clásicas* S. cerevisiae *y* S. pombe, *puede utilizar nitrato como fuente de nitrógeno. En la figura se muestra la organización de los genes codificantes de las enzimas implicadas en la asimilación del nitrato. Peculiaridad notable de los genes de esta vía metabólica es que se encuentran agrupados en el mismo cromosoma*

Desde el punto de vista técnico, el interés de las levaduras convencionales radica en su capacidad de producir determinadas moléculas, propias o procedentes de otros organismos. Se confía sobre todo en la producción de proteínas heterólogas, es decir, procedentes de otros organismos. Aunque *S. cerevisiae* se usa con éxito para este fin, a veces se presentan problemas causados por modificaciones postraduccionales de la levadura. Estos problemas podrían resolverse empleando en la síntesis de proteína otro tipo de levadura. A este respecto han merecido particular atención *Pichia pastoris*, *Hansenula polymorpha*, *Yarrowia lipolytica* y *Kluyveromyces lactis*.

Las levaduras metilotróficas (que asimilan metanol como fuente de carbono) pertenecen a los géneros *Hansenula*, *Pichia*, *Candida* y *Torulopsis*. En las especies *P. pastoris* y *H. polymorpha*, la presencia de metanol en el medio de cultivo induce la aparición de determinadas enzimas necesarias para su metabolismo. Algunos de los genes que codifican estas enzimas —por ejemplo, el gen AOX1 (alcohol oxidasa) de *P. pastoris* y MOX1 (metanol oxidasa) de *H. polymorpha*— poseen promotores que tienen una gran capacidad de expresión bien regulada, inducida por metanol y reprimida por glucosa. Estos promotores han resultado de una extraordinaria utilidad para la expresión de genes heterólogos en *P. pastoris* y en *H. polymorpha*. El sistema para la expresión de genes heterólogos en *P. pastoris* se expende ya en el mercado.

H. polymorpha asimila nitrato como fuente de nitrógeno. Esa especie y *P. pastoris* pueden cultivarse en fermentadores hasta densidades celulares muy altas, lo que permite un alto rendimiento de sus productos. Además, *H. polymorpha* posee una temperatura óptima de crecimiento a 40 ºC, lo que ahorra energía en la refrigeración de los fermentadores.

Desde un punto de vista básico, el uso de metanol reviste notable interés. En las levaduras cultivadas con metanol aparecen peroxisomas en cantidad copiosa; y en esos orgánulos la enzima alcohol oxidasa (o metanol oxidasa) cataliza la oxidación del metanol por O_2 a formaldehído y peróxido de hidrógeno. La biogénesis de los peroxisomas, que no se había podido estudiar en otras levaduras, puede ahora acometerse en estas especies.

Yarrowia lipolytica encuentra en alcanos y alquenos algunas de sus fuentes de carbono. Esta levadura posee un potente sistema secretor, que la hace muy atractiva para la sobreexpresión y excreción de proteínas heterólogas al medio de cultivo. Esta propiedad facilita después el procesado y purificación de los productos. También *Kluyveromyces* posee una buena capacidad secretora, que, sumada a su capacidad para utilizar lactosa, permiten pensar en ella para aprovechar los residuos de ciertas industrias lácteas.

Aunque otras levaduras han recibido menos atención, sus posibilidades no son menores. Recordemos, por ejemplo, *Zygosaccharomyces*, una levadura que plantea problemas en la industria alimentaria por su capacidad de crecer en productos envasados; *Schwannyomyces* capaz de degradar almidón, o *Pachysolen* que puede utilizar xilosa como fuente de carbono. Como cabía imaginar, entre las 600 especies de levaduras se esconden numerosas joyas biológicas.

José M. Siverio
Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Universidad de La Laguna.

Carlos Gancedo
Instituto de Investigaciones Biomédicas. CSIC, Madrid

Hormona luteinizante

Análogos estables

La hormona luteinizante desempeña un papel decisivo en las funciones de la reproducción. Le compete controlar la maduración de los ovocitos en las hembras (ovogénesis) y la de los espermatozoides en los machos (espermatogénesis). En esa tarea, la luteinizante (LH) cuenta con la cooperación de otra hormona, la estimuladora del folículo (FSH).

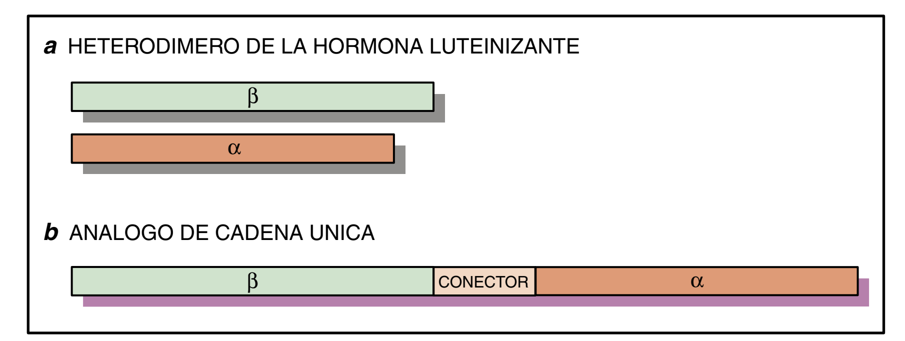
Una y otra son gonadotropinas. Es decir, se trata de hormonas sintetizadas en las células gonadotrofas de la glándula pituitaria, con un peso molecular de cerca de 28.000 dalton. LH y FSH pertenecen a la familia de las hormonas glicoproteicas. Los otros miembros de la familia son la hormona estimuladora del tiroides (TSH), también sintetizada en la glándula pituitaria y requerida para el buen funcionamiento de la glándula tiroides, y la hormona gonadotropina coriónica (CG), producida por la placenta y necesaria para el mantenimiento del cuerpo lúteo durante el embarazo.

En clínica, las gonadotropinas sirven de agentes de diagnóstico; en terapéutica se emplean en los tratamientos de infertilidad y de reproducción asistida. Dada su importancia, desde hace años se trabaja intensamente en la obtención de preparados hormonales de alta consistencia y actividad biológica que satisfagan el rigor y especificidad que exigen las terapias de infertilidad. Con el mismo afán se persigue el desarrollo de análogos terapéuticos de estas hormonas. En ambos terrenos se han conseguido notables avances, gracias a la utilización de las técnicas del ADN recombinante.

Las hormonas glicoproteicas son heterodímeros. Constan de dos subunidades proteicas, α y β, producto de dos genes distintos. Dentro de una misma especie, la secuencia de aminoácidos de la subunidad α es común a todos los miembros de la familia gonadotrópica, mientras que la de la subunidad β es diferente y confiere la actividad biológica específica de cada glicoproteína. Ambas subunidades se asocian intracelularmente, aunque no forman enlace covalente. Luego, los heterodímeros se liberan fuera de la célula y se unen a sus receptores específicos. La unión entre glicoproteína y receptor produce la activación del mensajero AMP cíclico, molécula que induce una cascada de reacciones secundarias que resultan en la estimulación de la producción de esteroides en las gónadas.

La formación del heterodímero constituye un requisito indispensable para la función hormonal. Ahora bien, dado que la asociación de las subunidades α y β se realiza de forma no covalente, la disociación del heterodímero en subunidades inactivas se produce con enorme facilidad, lo que se convierte en un grave contratiempo para abordar, en las gonadotropinas, la relación entre su estructura y su función.

El problema de la disociación adquiere proporciones especiales en el caso de la hormona luteinizante, cuya secreción, comparada con la del resto de los miembros de la familia, es bastante baja por la propia ineficacia del proceso de asociación de las subunidades en el interior celular. A mayor abundamiento, la luteinizante es, entre las glicoproteínas, una de las que exhiben menor estabilidad



1. Representación esquemática de las cadenas proteicas de las subunidades α y β de la hormona luteinizante. a) En el heterodímero las cadenas se sintetizan por separado, para asociarse luego de forma no covalente en la hormona activa. b) En el análogo de cadena única, las cadenas, unidas mediante enlace covalente, se sintetizan en un polipéptido

durante los procesos de purificación y almacenamiento, por culpa, una vez más, de la disociación del heterodímero.

En un intento por superar esta etapa de asociación/disociación que condiciona los estudios de estructura-función de las gonadotropinas y, principalmente, de la hormona luteinizante, en el laboratorio de I. Boime, de la Universidad de Washington, hemos dirigido la síntesis de una cadena polipeptídica que contiene ambas subunidades de la hormona luteinizante unidas por enlace covalente.

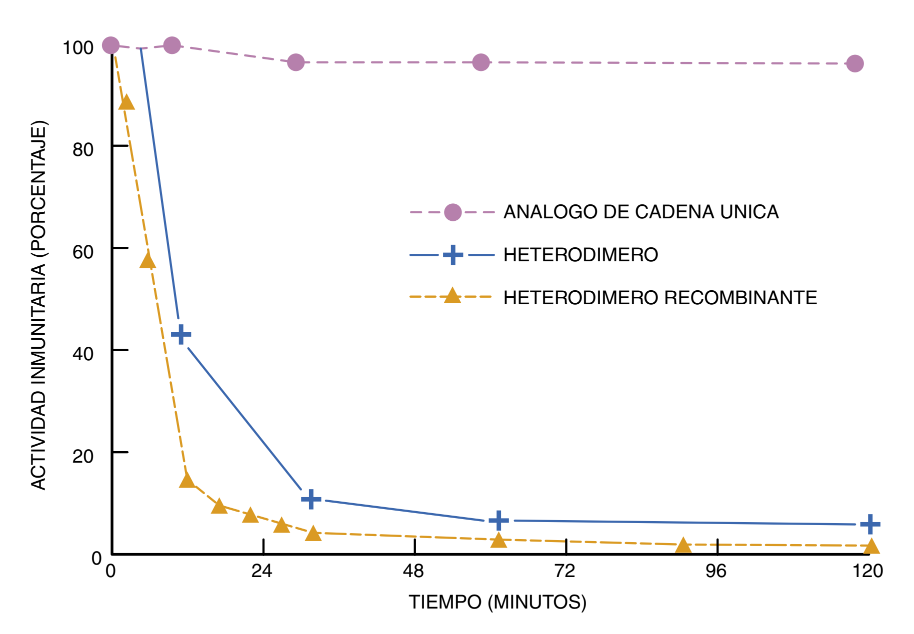
Con ese propósito, y sirviéndonos de las técnicas del ADN recombinante, construimos un gen en el que hemos fusionado las regiones codificantes de los genes humanos de la subunidad β de la hormona luteinizante y de la subunidad α (*véase la figura. 1*). Al evitar, con esa manipulación genética, la disociación del heterodímero en subunidades aisladas carentes de actividad biológica, se espera un aumento en la secreción y estabilidad del complejo. Se trata de una estrategia seguida antes en el mismo laboratorio del doctor Boime por T. Suguhara, con las secuencias humanas de las hormonas CG y FSH; en ambos casos, las cadenas construidas se secretan eficazmente y despliegan la actividad biológica que les corresponde.

En la unión covalente de ambas subunidades de la hormona luteinizante hemos considerado la posible necesidad de un conector ("linker") que confiera flexibilidad entre las cadenas y facilite la correcta orientación de las mismas. Dado que el tipo de conector podría repercutir en la secreción y actividad de las cadenas proteicas, hemos construido variantes de cadena única de la hormona luteinizante, en las que hemos introducido unidades conectoras de diferente extensión y secuencia aminoacídica.

Los estudios realizados con los análogos construidos han mostrado que, comparado con los bajos niveles de secreción que caracterizan al heterodímero, las variantes de cadena única de la hormona luteinizante se secretan de forma eficaz y abundante. Además, conservan su actividad biológica *in vitro*, es decir, mantienen la capacidad de unirse al receptor y de estimular la producción de AMP cíclico a la manera del heterodímero. El tipo de conector influye en la secreción de las distintas cadenas proteicas, aunque no parece hacerlo en la actividad biológica de las mismas.

Asimismo, nuestros resultados han revelado que, sometidas a los mismos tratamientos térmicos, las variantes de cadena única de la hormona luteinizante son, en términos de actividad inmunitaria y de capacidad de unión al receptor, mucho más estables que el heterodímero (*figura 2*).

La propia presencia de conector facilita el que se dé la estabilidad máxima. Esta termostabilidad, una característica de especial interés, confiere un gran atractivo a los análogos de cadena única para un amplio campo de aplicaciones, que podrían ir del desarrollo de protocolos ("kits") de diagnóstico altamente estables al diseño de análogos de vida media superior a la del heterodímero, que les permita mantenerse estables y activos en la circulación de los pacientes por largo tiempo.



2. Estabilidad térmica de la hormona luteinizante y sus análogos. El heterodímero y la versión recombinante del mismo pierden su actividad inmunitaria, es decir, su capacidad de ser reconocidos por un anticuerpo específico, durante los primeros 60 minutos de un tratamiento térmico a 65 °C. Por contra, la immunorreactividad del análogo de cadena única no resulta afectada, ni siquiera después de dos horas de tratamiento a la misma temperatura

VICENTA GARCÍA CAMPAYO
Departamento de Biología
Molecular y Farmacología
Facultad de Medicina
de la Universidad
de Washington en Saint Louis

Síndrome de Brugada

Origen hereditario

En 1992 describíamos un nuevo síndrome caracterizado por episodios de síncope y muerte súbita inesperada en pacientes con un corazón estructuralmente normal y un electrocardiograma característico. Distinguíase éste por un patrón de bloqueo de rama derecha y elevación del segmento ST en las derivaciones precordiales unipolares V1 a V3.

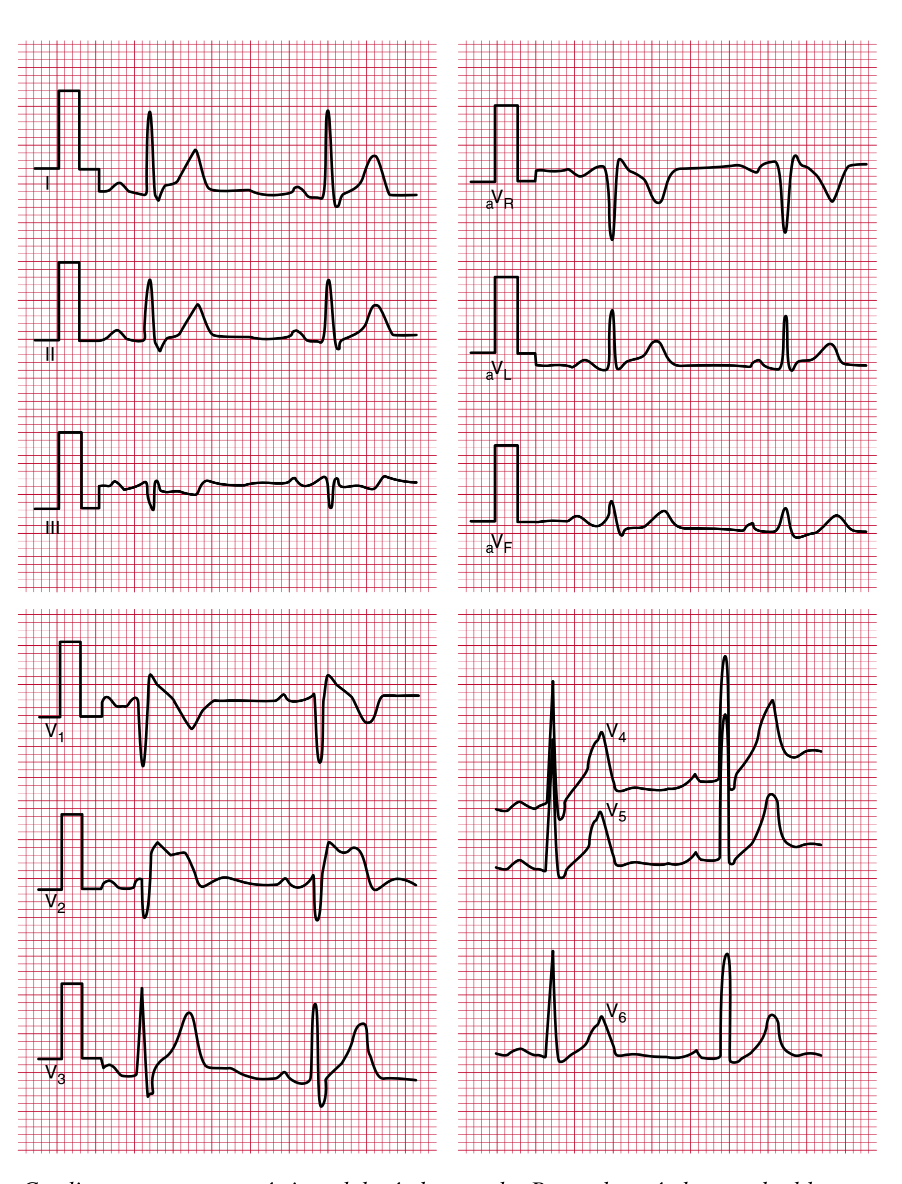
Seis años después, descubríamos la naturaleza genética de la enfermedad. La transmisión es autosómica dominante. El gen implicado no se halla, pues, en un cromosoma sexual. Hasta ahora, se han identificado ya tres mutaciones distintas y un polimorfismo en el canal de sodio en dos familias y en un paciente esporádico.

Los canales de sodio son proteínas cifradas por genes. El estudio de las mutantes nos muestra que éstas se recuperan del estado de inactivación antes que los canales no mutados, lo que provoca una disfunción de los mismos.

Como en muchas otras enfermedades cardíacas determinadas genéticamente, la enfermedad es heterogénea. Está causada por más de un gen. Distribuido por casi todo el mundo, el síndrome presenta una incidencia difícil de evaluar, si bien parece responsable de 4 a 10 muertes súbitas por año por 10.000 habitantes en Tailandia y Laos, donde representa la causa más frecuente de muerte natural en adultos jóvenes.

Podemos atribuir al síndrome hasta el 50 % de todas las muertes súbitas anuales en pacientes con un corazón normal. El diagnóstico no entraña mayor problema gracias al electrocardiograma característico. La existencia de formas ocultas y formas intermitentes del síndrome dificulta, sin embargo, su diagnóstico. El electrocardiograma puede modularse mediante cambios autónomos y la administración de drogas antiarrítmicas. La estimulación beta-adrenérgica normaliza el electrocardiograma, mientras que la administración de ajmalina, flecainida o procainamida intravenosa aumenta la elevación del segmento ST. Estas drogas permiten desenmascarar los casos ocultos e intermitentes.

El pronóstico de los pacientes con este síndrome es malo si no se implanta un desfibrilador, ya que las drogas antiarrítmicas (amiodarona o beta-bloqueantes) no protegen contra la muerte súbita recurrente. El mal pronóstico amenaza lo mismo a los pacientes que ya sobrevivieron a un episodio de muerte súbita, que a los individuos asintomáticos en quienes el electrocardiograma característico del síndrome se registró por casualidad. La manipulación genética probablemente ofrecerá una curación definitiva de esta enfermedad en un futuro que esperamos no sea muy lejano.



Cardiograma característico del síndrome de Brugada: síndrome de bloqueo de rama derecha, elevación del segmento ST en las derivaciones V1-V3 y muerte súbita. Recibe ese nombre de sus descubridores, firmantes de este artículo, tres cardiólogos hermanos

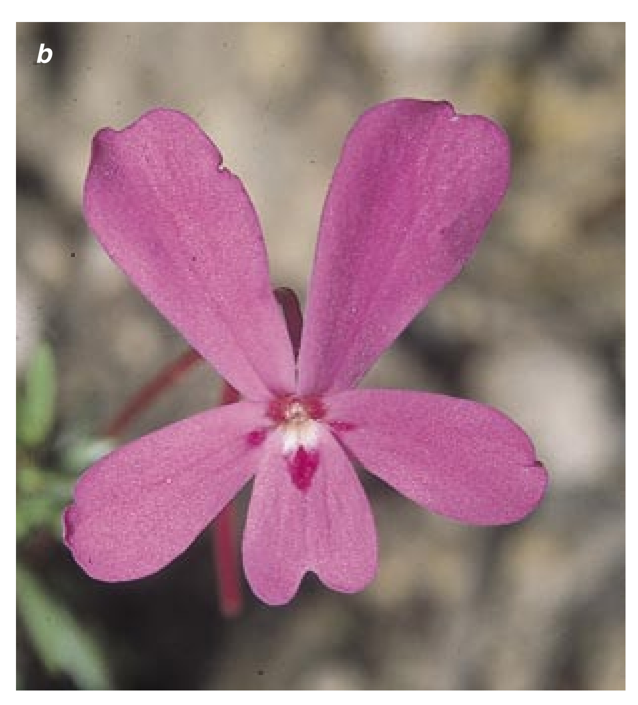
JOSEP BRUGADA, PEDRO BRUGADA y RAMÓN BRUGADA
Hospital Clínico, Universidad de Barcelona,
Instituto de Investigación y Docencia Cardiovascular Aalst, Bélgica
Facultad Baylor de Medicina Houston

Morfología floral

Relación con el éxito reproductor

Desde siempre, la variabilidad de las formas florales ha ejercido una profunda fascinación entre naturalistas y profanos. Sin embargo, es a partir de la publicación de los trabajos de Christian Sprengel —a





Petrocoptis grandiflora (a) *y* Viola cazorlensis (b)*, dos endemismos ibéricos de área restringida en los que se ha estudiado la influencia de la morfología de las flores en el éxito reproductor*

finales del siglo xviii— y de Charles Darwin —casi un siglo más tarde—, cuando tales variaciones morfológicas comienzan a describirse, analizarse desde un punto de vista funcional e interpretarse en razón de su adaptación a los polinizadores.

Transcurrido más de un siglo de biología evolutiva, sabemos ya que las variaciones de la morfología floral intervienen en el éxito reproductor. En particular, la interacción entre polinizadores y plantas entomófilas (las polinizadas por insectos) ha desempeñado un papel clave en la evolución de la morfología de las flores.

Para sacar a la luz el efecto ejercido en el éxito reproductor de determinadas especies por estas variaciones, se han ideado diversos experimentos, fundados unos en la variación natural en las poblaciones y basados otros en procesos artificiales. Así, partiendo del análisis de la variación en uno o varios rasgos de las flores (tamaño de los pétalos, exerción o grado en que los estambres o estigmas se prolongan fuera de la flor, etc.), se trata de definir en qué medida tal variación se traduce en diferente producción de semillas y en exportación de polen. Ambas —producción de semillas y exportación de polen— constituyen los indicadores habituales del éxito reproductor femenino y masculino, respectivamente.

Gracias a esos experimentos se han descubierto numerosas vías a través de las cuales las variaciones morfológicas de la flor influyen en la reproducción. Las adaptaciones en cuestión van desde cambios en el comportamiento de los polinizadores —incrementando o disminuyendo el número de visitas— hasta cambios que modifican la eficacia en la exportación de polen o en los niveles de polinización cruzada. De la experimentación se desprende que las variaciones observadas se prestan a muy diversa interpretación; unas parecen ejercer efectos positivos en la reproducción, otras variaciones efectos neutros y otras negativos. Se ha observado incluso que el éxito reproductor masculino y femenino no tienen por qué responder en el mismo sentido a las variaciones morfológicas de una especie.

Nuestro grupo viene trabajando, desde hace algunos años, en la biología de cierta cariofilácea endémica del noroeste de España. Nos hemos ocupado de la variación floral de *Petrocoptis grandiflora* en punto a tres caracteres: longitud del pétalo, longitud del cáliz y longitud del pedúnculo. La longitud del pétalo afecta en potencia a la atracción a los polinizadores; la del cáliz, a la accesibilidad del néctar floral, y la del pedúnculo a la presentación de la flor a los polinizadores.

De las tres variables, solamente la longitud del pétalo guarda una correlación positiva con el número de semillas producidas. Pero ello no se debe a que las flores de pétalos mayores sean más atractivas para los polinizadores o se polinicen con eficacia mayor. Son otros los factores responsables de esta variación; por ejemplo, ventajas espaciales o temporales a la hora de acceder a los recursos o el propio diseño de la arquitectura de la inflorescencia.

En España también, Carlos Herrera, de la Estación Biológica de Doñana, ha abordado la biología y ecología de la violeta de Cazorla (*Viola cazorlensis*), con particular atención sobre la contribución de diferentes factores morfológicos y ecológicos a su éxito reproductor femenino. De acuerdo con sus resultados, si bien las variaciones en la morfología de las flores tienen incidencia en la producción de semillas, su importancia es pequeña comparada con el tamaño de la planta o el número de flores desarrolladas en un episodio reproductivo. En su opinión, las presiones selectivas sobre la morfología de las flores no alcanzarían, ni de lejos, la eficacia evolutiva de otros factores ecológicos a la hora de determinar las diferencias entre plantas.

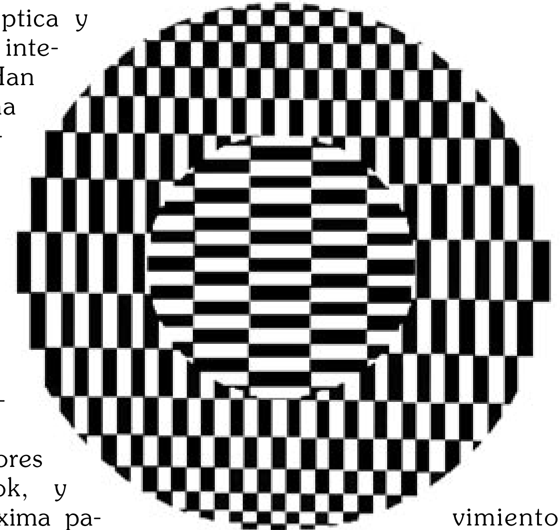
Las posibilidades de variación en la morfología de las flores son inmensas. La selección de unos rasgos requiere que se trate de caracteres variables y heredables, asociados con diferencias en el éxito reproductor. Las variaciones en la morfología floral constituyen, sin duda, uno de los principales sustratos para el cambio evolutivo, la divergencia y, en última instancia, la especiación.

JAVIER GUITIÁN
Dpto. de Biología Vegetal
Universidad de Santiago

En flotación

Un motivo de Op-Art debido a Hajime Ouchi, publicado inicialmente en Japón y retomado después en una colección estadounidense muy conocida entre artistas gráficos (*Japanese Optical and Geometrical Art*, Dover, 1977) tiene intrigados a los especialistas en percepción visual. Una región circular, rellena de una textura en damero apaisada, se halla cercada por una corona circular texturada también en damero, pero tendida ahora en sentido vertical. Cuando este motivo es desplazado en movimiento de vaivén horizontal, la región central parece desprenderse de la página y deslizarse sobre la textura que la circunda. Es sabido que las texturas muy contrastadas y periódicas inducen en ocasiones inestabilidades visuales, o colores ilusorios, clasificados juntamente con los efectos de tornasol o "moiré". La figura de Oichi (*a la derecha*), localizada por Lothar Spillman, un especialista en efectos cinéticos en la visión, ha dado pie a una carrera científica.

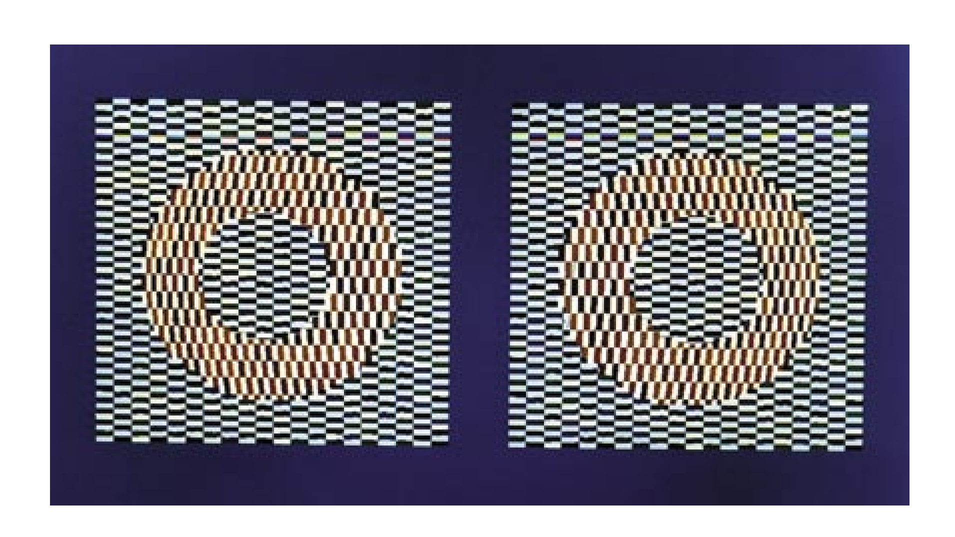
Dos investigadores italianos, Nicola Bruno y Paola Bressan, han estudiado esta ilusión óptica y han construido de ella interesantes variaciones. Han demostrado que, si una textura *A* está rodeada por una textura *B*, rodeada a su vez por *A*, entonces es *B* la que parece desplazarse. Han demostrado asimismo que, en visión estereoscópica, el efecto de deslizamiento se mantiene (*abajo*) o incluso queda reforzado.

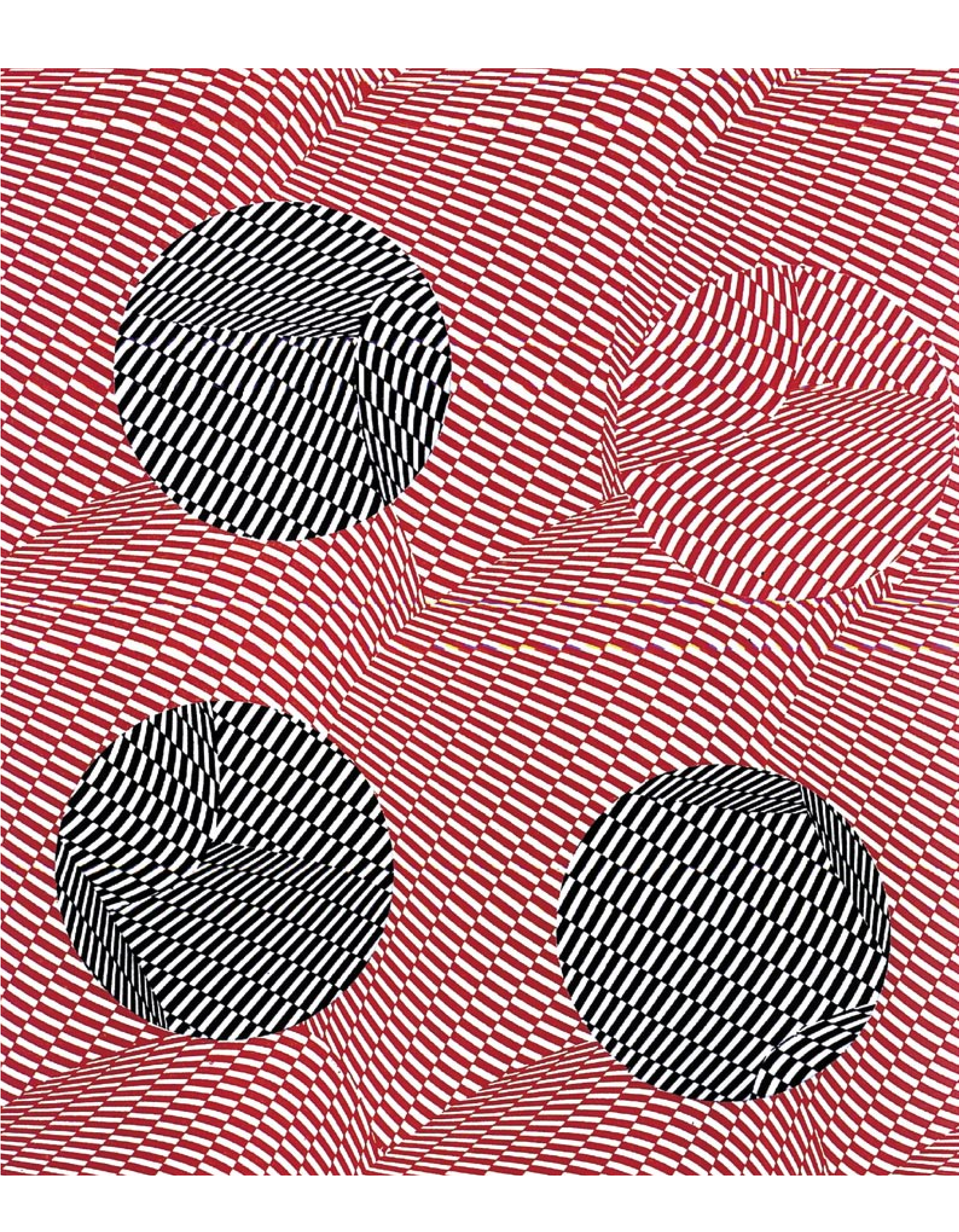


Según los investigadores australianos Hine, Cook, y Rogers, la ilusión es máxima para texturas orientadas que forman entre sí un ángulo de 60º.

Los rayados puros no son muy eficaces. El aspecto damero —o más exactamente, la existencia de elementos con fronteras nítidas— parece ser importante. El movimiento puede implicar a una parte principal de la imagen. Dos porciones de imagen dotadas de orientaciones diferentes pueden moverse a la vez en direcciones contrarias. Lo más frecuente es que el movimiento ilusorio sea federador: las zonas con elementos cuyas orientaciones están correlacionadas se desplazan de forma coherente (*página de la derecha*). Cabe en lo posible que la ilusión sea indicativa de un proceso que tiende a subdividir el ambiente en conjuntos significativos.

JACQUES NINIO,
CNRS y École normale supérieure, París.





Un nuevo brillo en las pantallas de televisión

La pantalla de visualización por plasma satisface por fin un viejo deseo: una pantalla grande y luminosa que, por su grosor, pueda colgarse en la pared como un cuadro

Alan Sobel



1. LAS PANTALLAS DE PLASMA LIGERAS Y DELGADAS pueden tener tamaño suficiente para apreciar bien el detalle que ofrece la televisión de alta definición y absorber la atención del espectador.

El receptor de televisión es, a buen seguro, el producto electrónico de mayor aceptación de todos los tiempos. Suele haber más de uno en los hogares y su número supera al de teléfonos en muchos casos.

Pese a semejante éxito, nuestro receptor deja mucho que desear. Es voluminoso, pesado y algo delicado. Tal vez la mayor frustración estribe en que no resulta comercial fabricar un aparato tradicional, basado en un tubo de imagen, cuya pantalla mida en diagonal más de 1000 milímetros. Amen de ser carísimo, el televisor pesaría cientos de kilogramos y pasaría con mucha dificultad por las puertas del piso. La televisión que hoy se contempla en pantalla grande se vale de técnicas de proyección de diversos tipos que, comparadas con los tubos de imagen, limitan más o menos el brillo o los ángulos de visión.

Ante la llegada inminente de la televisión de alta definición (TVAD), no puede tolerarse por más tiempo esta incapacidad de producir pantallas grandes, luminosas, con la entera gama cromática. La TVAD —técnica de televisión con imágenes de resolución mucho más alta, ya comercializada en Japón y de próxima introducción en América y Europa— impresiona muy poco al espectador si no se visualiza en una pantalla que, como mínimo, mida 1000 milímetros en diagonal (o todavía mejor, 1250 o 1500). Sólo una pantalla muy grande permitirá apreciar los detalles en toda su riqueza y absorberá la atención del espectador.

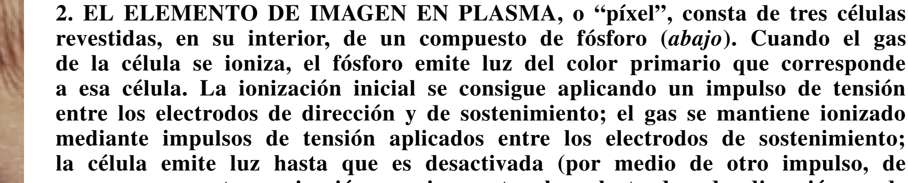
Como preparación de la previsible demanda de este tipo de pantallas, hay empresas de técnica puntera que trabajan en distintas técnicas de visualización en pantalla plana, en su mayoría inventadas ya hace años, si no décadas. De todas ellas, la única que se aproxima a la viabilidad comercial es la del panel visualizador de plasma (PDP, plasma display panel), también denominado de descarga gaseosa. A la hora de redactar este artículo, se anuncia que los ingenieros de NEC han presentado en una pantalla de 1270 milímetros imágenes de TVAD con relación de aspecto (anchura/altura) de 16:9. Fujitsu, Mitsubishi, Toshiba y Plasmaco han hecho demostraciones en paneles de hasta 1056 milímetros en diagonal, tanto en la relación de aspecto 4:3 de la TV actual como en la de 16:9.

A mediados de marzo, por un millón y medio de pesetas podía comprarse un monitor de 1056 milímetros de Fujitsu, que se diferenciaba de un televisor sólo por la carencia de sintonizador y altavoces. La Bolsa de Nueva York ha instalado en su parquet unos 1000 paneles de Fujitsu para presentar las cotizaciones, y estos paneles están ya apareciendo en las sesiones comerciales, en las que una imagen grande puede impresionar a los asistentes. Es de prever que los precios caerán en picado cuando se disponga de más instalaciones de fabricación y exista un mercado masivo.

Se prevé, en efecto, un mercado global de cientos de millones de pantallas valoradas en decenas de billones de pesetas. Ante ese horizonte, las compañías japonesas mencionadas han invertido en conjunto más de 150.000 millones de pesetas en equipos de producción nuevos o ampliación de los ya existentes, así como en algunas firmas estadounidenses dedicadas a este campo. Otras empresas, que disponen ya de pantallas de plasma de tamaño manejable, persiguen la fabricación de pantallas de 1000 milímetros, sin haberlo logrado todavía. Entre ellas figuran Philips y Thomson Tubes Electroniques, amén de firmas estadounidenses, coreanas y chinas.

Además de hacer factible la TVAD, la pantalla de plasma satisfará una añeja aspiración: una pantalla de televisión, plana y de poco grosor, que pueda colgarse de la pared. En el transcurso de los años se desarrollaron muchos tipos diferentes de pantallas planas, de los que sólo algunos, especialmente las pantallas de cristal líquido, han logrado comercializarse en ordenadores portátiles, cabinas de aeronaves e instrumentos electrónicos diversos. Sin embargo, ninguna otra técnica que no sea la de descarga en plasma permite fabricar una pantalla con las dimensiones necesarias para TVAD. Por añadidura, la mayoría de las otras pantallas no se prestan bien para la visualización de imágenes con plena movilidad, aunque sean muy corrientes las pequeñas pantallas de cristal líquido, a todo color, en



2. EL ELEMENTO DE IMAGEN EN PLASMA, o “píxel”, consta de tres células revestidas, en su interior, de un compuesto de fósforo (*abajo*). Cuando el gas de la célula se ioniza, el fósforo emite luz del color primario que corresponde a esa célula. La ionización inicial se consigue aplicando un impulso de tensión entre los electrodos de dirección y de sostenimiento; el gas se mantiene ionizado mediante impulsos de tensión aplicados entre los electrodos de sostenimiento; la célula emite luz hasta que es desactivada (por medio de otro impulso, de temporización precisa, entre los electrodos de dirección y de sostenimiento). El gas ionizado, llamado plasma, emite radiación ultravioleta que estimula la emisión de luz de color por los fósforos (*abajo izquierda*). (El electrodo bus, contiguo al de sostenimiento, suministra la intensidad de corriente mayor que se necesita al principio de cada descarga de impulso.) Como en un monitor ordinario de ordenador o de vídeo, las diferencias de nivel de brillo entre los tres colores primarios en cada uno de los muchos miles de píxeles permiten recrear cualquier color y reproducir cualquier imagen en la pantalla (*izquierda*).

televisores portátiles y equipos de vídeo.

Las pantallas planas aventajan en varios aspectos importantes a los tubos de imagen de televisión, llamados con más propiedad tubos de rayos catódicos, y a los sistemas de proyección utilizados en las grandes pantallas de televisión. Aparte de su evidente superioridad en ligereza, ofrecen una resolución y luminancia uniforme sobre toda su superficie, a diferencia de los tubos de rayos catódicos y proyectores, que tienden a perder resolución y luminancia en las esquinas y bordes. Las pantallas planas son más estéticas, dan mejor rendimiento y consumen menos energía que las pantallas de proyección del mismo tamaño, si bien su rendimiento es menor que el de los tubos de rayos catódicos.

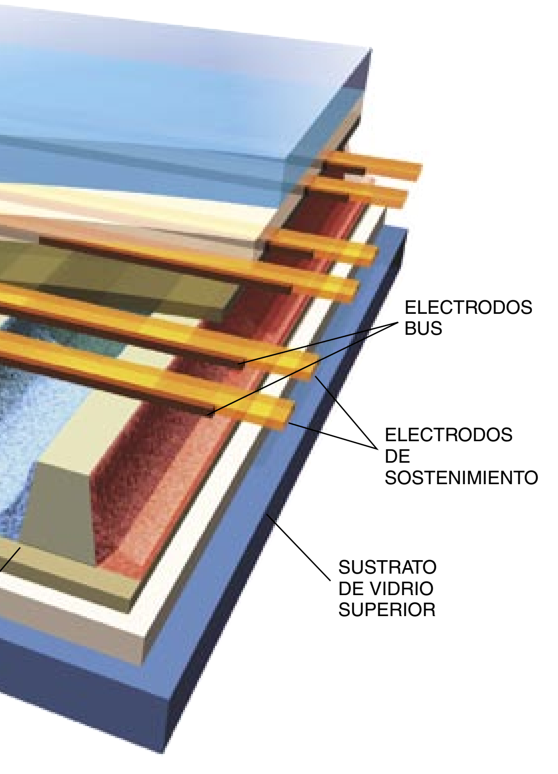
La técnica que está a punto de alcanzar la vieja meta de una televisión sobre pantalla plana tiene mucho en común con la lámpara fluorescente ordinaria. El panel de plasma se basa igualmente en el paso de una corriente eléctrica a través de un gas, arrancando electrones de los átomos o moléculas, es decir, ionizándolo. El gas suele ser una mezcla de helio y xenón que, al ionizarse, emite radiaciones ultravioleta que estimulan minúsculas porciones de fósforo en el interior del panel para producir luz visible. Se denomina “plasma” el gas ionizado, mezcla eléctricamente neutra de electrones, iones de carga positiva y negativa y moléculas de gas sin ionizar.

Este fenómeno fotoemisor se produce a escala de miniatura por todo el panel. En esencia, la pantalla está constituida por diminutos elementos de imagen (píxeles), compuesto cada uno por tres células. Cada célula comprende un par o una terna de electrodos, además de unas sustancias químicas, denominadas fósforos, que recubren las paredes, el fondo y a veces la parte frontal de la célula. La corriente que circula entre los electrodos ioniza el gas; y éste emite luz ultravioleta que estimula el fósforo de esa célula. Según sea la célula, el fósforo emitirá luz en uno de los tres colores primarios —rojo, verde o azul— cuya combinación permite obtener el color que se desee.

Esta descripción básica encubre aspectos que han erizado de dificultades el desarrollo de las pantallas de plasma. Ante todo, la manera de ionizar el gas. Si los dos electrodos se introducen en un gas y se les aplica una tensión eléctrica, nada sucederá mientras no haya al menos una partícula cargada —electrón o ion— en el

seno del gas que conduzca la corriente eléctrica de un electrodo a otro. Al moverse a través del gas, esta partícula cargada, llamada de cebado, bajo la acción de la tensión aplicada, choca contra moléculas o átomos neutros y los ioniza. A su vez, estas partículas cargadas ionizan otros átomos, y la corriente aumenta. Se produce luz ultravioleta (y en su caso, visible o infrarroja), cuando los iones positivos del gas capturan electrones del plasma y emiten fotones.

El diseño de las células de una pantalla entraña dos retos: el suministro de partículas de cebado y la limitación de la corriente que circula entre los electrodos. Para conseguir partículas de cebado podría servir un



rayo cósmico errático que ionizara la molécula, si pudiésemos esperar hasta su tránsito casual, lo cual es obviamente absurdo en una pantalla cuyas células han de activarse y desactivarse muchas veces por segundo. Los dispositivos de pantalla incorporan una descarga auxiliar para suministrar partículas de cebado, posibilitando así la rápida activación de las células.

Deben crearse las células de la pantalla de suerte tal, que la corriente que circula entre los electrodos no siga aumentando, lo que sería inevitable en caso de no controlarse. Si no se aplicara limitación a la corriente, el gas llegaría a ionizarse por completo y se produciría una descarga disruptiva en arco que destruiría el dispositivo.

Las pantallas de plasma pueden ser de corriente alterna y de corriente continua. Domina el modelo de corriente alterna. En estas pantallas, la corriente viene limitada por el propio diseño de las células. Una lámina sutil de material aislante separa del gas que los rodea a los dos electrodos de cada célula del gas; se comporta como un condensador que sólo deja pasar corriente alterna. Además, este condensador limita el flujo de corriente; la descarga nunca pueda crecer hasta el nivel de ruptura en arco.

Pero una pantalla de visualización no es una simple red de elementos fotoemisores. Para comprender el funcionamiento de una pantalla de plasma es preciso conocer también de qué manera se transforman en imágenes las señales aplicadas. Igual que en cualquier pantalla plana, las células de un panel de plasma se configuran en matriz. Los conductores eléctricos que terminan en los electrodos se disponen en filas y columnas, colocando un dispositivo fotoemisor —es decir, una célula— en cada intersección. Se requieren circuitos de excitación en cada fila y en cada columna para aplicar las tensiones que han de activar, o desactivar, las células correspondientes.

Las pantallas de televisión fueron los primeros visualizadores de imagen electrónicos; todas las pantallas actuales han heredado el tratamiento de la imagen en televisión, concebido para tubos de rayos catódicos. Consiste en el barrido de la pantalla por un haz de electrones, que se inicia en el extremo superior izquierdo para recorrer línea a línea, de izquierda a derecha y de arriba abajo, la pantalla entera. Una imagen completa constituye un cuadro. Los cuadros de televisión se transmiten 25 veces por segundo. La mayoría de las pantallas de ordenador se renuevan a 60 o más cuadros por segundo, aun cuando el contenido de la imagen no haya cambiado.

Por tener las células en disposición matricial, carecer de un conjunto primario único de haces electrónicos y responder con mayor lentitud que el tubo de rayos catódicos, las pantallas planas no pueden utilizar la técnica del barrido. Las señales deben aquí configurarse y aplicarse de suerte que se direccionen simultáneamente todas las células de una fila, pasando enseguida a la fila inferior, y así hasta que se haya formado un cuadro completo.

ALAN SOBEL, ingeniero eléctrico por la Universidad de Columbia y doctor en física por el Instituto Politécnico de Brooklyn, lleva más de 35 años en trabajos de investigación y desarrollo de pantallas electrónicas. Es editor de *Journal of the Society for Information Display*.

En un PDP de corriente alterna, se aplica sin cesar al panel entero una secuencia de impulsos de polaridad alternante cuya tensión sea muy poco inferior a la necesaria para excitar una descarga; ésta es la tensión de "sostenimiento". La célula se activa aplicando una tensión más alta al par de electrodos de fila y columna que le corresponda. Esa tensión mayor produce una descarga en el gas, haciendo que circule corriente y se cargue el condensador de la célula. La carga acumulada produce una tensión opuesta a la tensión de excitación, con lo que termina la descarga y la célula cesa de emitir luz. Sin embargo, en el siguiente impulso, de polaridad contraria, esa tensión acumulada se suma a la tensión de sostenimiento aplicada y la célula vuelve a activarse, y seguirá activándose mientras se mantenga la tensión de sostenimiento. Cada impulso de descarga gaseosa dura sólo alrededor de un microsegundo y produce una cantidad de luz muy pequeña. Pero pueden generarse hasta 50.000 impulsos por segundo, lo que da una luminosidad total considerable.

Para desactivar la célula se le aplica un impulso que reduce la carga almacenada en los condensadores. Las diferencias de brillo ("escala de grises") se logran controlando la fracción de tiempo que permanece activada cada célula. El principal inconveniente de este sistema —un problema común a todas las pantallas planas— es el enorme número de circuitos de excitación que se necesitan en torno de la periferia de la pantalla. Una pantalla de ordenador típica, con 480 filas y 640 columnas de píxeles y cada píxel compuesto por tres células, requiere $480 + (640 \times 3) = 2400$ circuitos de excitación, sea cual fuere el tamaño físico de la pantalla. En términos comparativos, un tubo de rayos catódicos necesita sólo dos circuitos de deflexión, que gobiernan, respectivamente, el movimiento hori-

Grande, brillante y orgánico

Paul E. Burrows, Stephen R. Forrest y Mark E. Thompson

Las técnicas en desarrollo para visualización en pantalla plana se cuentan hoy por docenas, casi por cientos. Quizá la de mayor futuro sea la de paneles electroluminiscentes orgánicos. Estos dispositivos, con capas activas de la milésima parte del grosor de un cabello humano, se experimentaron hace 10 años. Hoy los mejores de ellos generan un brillo por unidad de superficie muchas veces mayor que un tubo de televisión y funcionan —a menos de 10 volts— durante decenas de miles de horas. Las pantallas orgánicas trabajan con rapidez suficiente para visualizar imágenes en pleno movimiento, por lo que sirven también para televisores.

Lo que más impresiona de estas pantallas deriva, no obstante, de las características intrínsecas de sus componentes orgánicos. Como ejemplo, la débil ligazón intermolecular de estos materiales permite depositar las capas activas sobre sustratos de plástico, delgados y flexibles. Las pantallas que así se obtengan podrán enrollarse o adaptarse a superficies de diversa forma. Capas activas y sustratos de plástico son tan ligeros, que el peso de un monitor de ordenador podría reducirse a poco más de cien gramos.

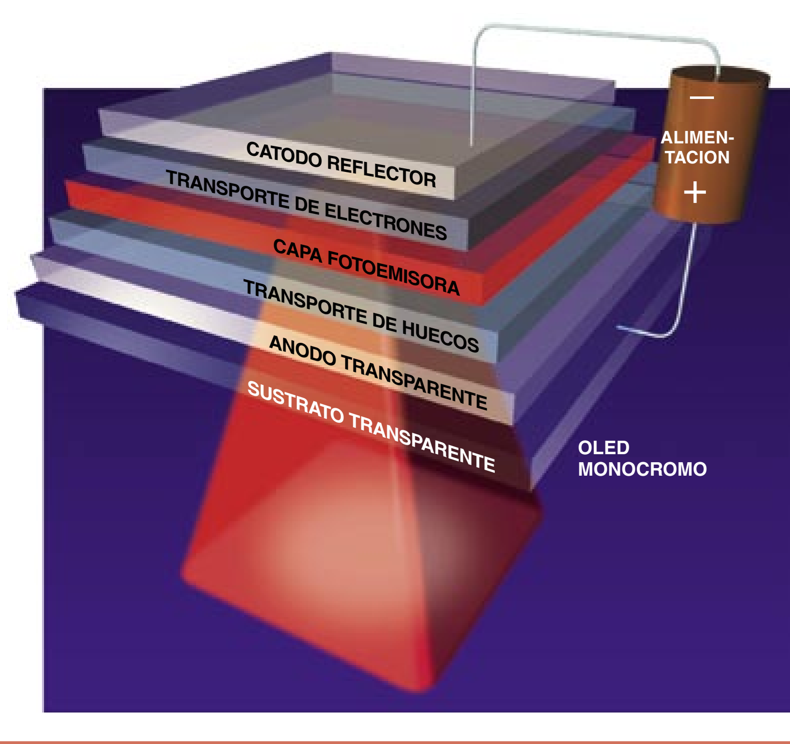
La aptitud de los semiconductores orgánicos para formar películas delgadas de alta calidad sobre cualquier sustrato promete grandes transformaciones, puesto que se podría hacer crecer dispositivos electroluminiscentes orgánicos sobre extensas superficies a muy bajo coste: requisito imprescindible para construir paneles planos de gran tamaño. Por otro lado, los semiconductores habituales tienen que crecer sobre obleas, sustratos costosos cuya estructura cristalina sea similar a la de la película. Algún día cubriremos toda una pared con pantallas de tipo orgánico, aunque hasta el momento la mayor pantalla en color obtenida, experimental por supuesto, mida 125 milímetros de diagonal.

Este caudal de posibilidades ha espoleado programas de investigación comercial multimillonarios, en Eastman Kodak, Motorola y otras empresas de EE.UU., Japón y Europa. Se han creado firmas independientes, como Universal Display Corporation en EE.UU. y Cambridge Display Technology en el Reino Unido, con el único fin de convertir en producto comercial el dispositivo fotoemisor orgánico (OLED, organic light-emitting device).

Los semiconductores orgánicos se componen principalmente de carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno. Sus moléculas, que comprenden docenas o centenares de átomos, emiten fotones cuando pasan del estado de excitación electrónica al estado fundamental, relajado. Los semiconductores orgánicos esenciales son el Alq_3, el α-NPD y una molécula emisora de luz roja llamada DCM, utilizada también en láseres de base orgánica y cuya fórmula completa es 4-(dicianometileno)-2-metil-6-(4-dimetilaminoestirilo)-4H-pirano.

Nace la luz

Un OLED típico consta de tres capas de material semiconductor orgánico —la de transporte de electrones, la fotoemisora y la de transporte de huecos—, emparedadas entre un cátodo y un ánodo. Desde el cátodo y el ánodo se inyectan, respectivamente, portadores de carga negativa (electrones) y portadores de carga positiva (huecos), los cuales son transportados a la región fotoemisora bajo el influjo de un campo eléctrico. En las moléculas de la región fotoemisora se asocian entre sí un electrón y un hueco, formando la entidad llamada excitón. Esta entidad, eléctricamente neutra, puede saltar de una a otra molécula; en milésimas de microsegundo se desintegra para emitir luz de una determinada energía, es decir, de un cierto color. Eligiendo la molécula orgánica apropiada en



zontal y el movimiento vertical del haz de electrones, más tres circuitos de modulación, uno para cada color. Aun con todas las economías logradas en los circuitos integrados, ese alto número de circuitos explica el coste de las pantallas planas.

En el otro tipo de pantalla de plasma, la de descarga gaseosa por corriente continua, se aplican también tensiones impulsivas. Sin embargo, a diferencia de las de corriente alterna, los impulsos siempre tienen aquí la misma polaridad. Pese a la creatividad prodigada en el diseño, por ahora sólo existe un tipo de pantalla grande predominante, desarrollada en buena medida bajo el patrocinio por 30 años de los Laboratorios NHK. (NHK es la entidad de radiodifusión estatal del Japón.)

NHK ha hecho demostraciones de pantallas de 1056 milímetros con buenos resultados de luminancia y de contraste. Pero al compararlas con las pantallas de corriente alterna resultaban pesadas y de escaso rendimiento, generando un calor excesivo asociado a la luz. Además, su complicada configuración geométrica encarece la fabricación.

Otro problema grave es el tiempo de vida útil. El material utilizado en el electrodo negativo (cátodo) tiende a chisporrotear, proyectando átomos que vuelven a depositarse en otros lugares de la célula. El efecto causado es más destructivo que en los paneles de corriente alterna, al ser metálico

la capa fotoemisora, se producirá luz roja, verde o azul. Debe hacerse transparente el ánodo o el cátodo para que la luz salga hacia el espectador.

Como alternativa, ambos electrodos pueden ser transparentes si están compuestos de un óxido de indio y estaño semiconductor. Estos OLED claros descubren posibilidades insospechadas, por ejemplo, que una ventana sirva también de pantalla visualizadora.

Una segunda clase de compuestos orgánicos utilizados en los OLED son los polímeros, largas cadenas de una unidad molecular repetida hasta miles de veces en la molécula. Las pantallas de OLED poliméricos ofrecen casi el mismo brillo y rendimiento que sus parientes basados en moléculas pequeñas y deposición en vacío. Hasta hoy, sin embargo, el tiempo de vida útil de los OLED de deposición en vacío excede en un orden de magnitud al de los dispositivos poliméricos, lo que en parte se debe a la excepcional pureza del material que permiten obtener las pequeñas moléculas orgánicas.

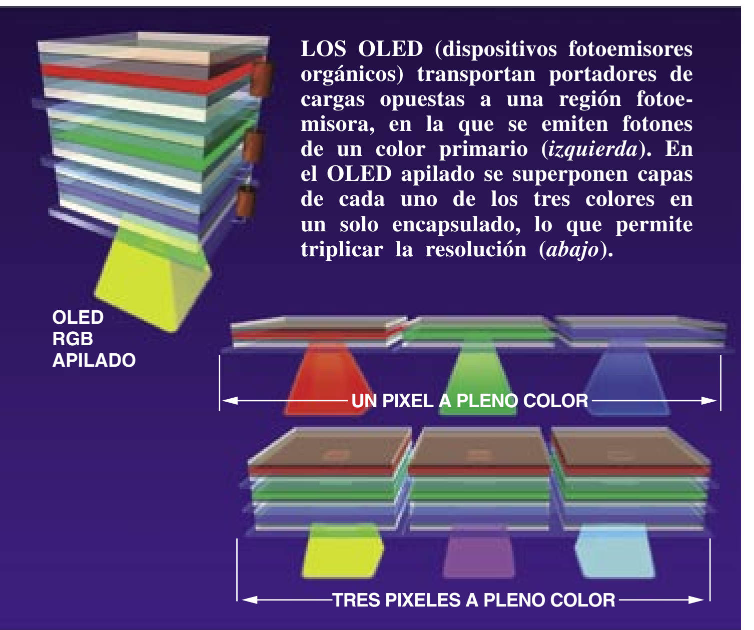
Aplicaciones comerciales

Las pantallas OLED de deposición en vacío más eficaces y duraderas son las de luz verde, mientras que los materiales que emiten en rojo y en azul se quedan rezagados en ambos aspectos. Los dispositivos de mejor calidad proporcionan hoy un rendimiento luminoso de hasta 18 lumen por watt, que es de 5 a 10 veces el de las pantallas de cristal líquido, pero sólo llega a la cuarta parte del rendimiento de un tubo de imagen en televisión. Una vez encapsulados para preservarse del vapor de agua atmosférico, los OLED pueden funcionar sin interrupción decenas de miles de horas (hasta que el brillo inicial descienda al 50 %), lo que es comparable con un tubo de imagen. La temperatura de la pantalla en funcionamiento, sin embargo, debe mantenerse por debajo de los 100 grados Celsius. A no tardar mucho se dispondrá de mejores materiales que emitan en azul y rojo y se resolverá el problema de la temperatura.

Los OLED monocromáticos en luz verde son ya satisfactorios para aplicaciones comerciales. Pioneer Corporation acaba de presentar un panel plano OLED monocromo de 2,5 × 10 centímetros, que se utilizará en automóviles para visualizar información de navegación.

Los OLED monocromos no son más que el principio. Las singulares propiedades de los semiconductores orgánicos permiten nuevas arquitecturas de dispositivos irrealizables con los procesos habituales. Nosotros hemos demostrado que pueden construirse tres OLED transparentes, rojo, azul y verde, superpuestos. Cada uno de estos tres dispositivos emite su propio color a través de las capas orgánicas transparentes, los contactos y el sustrato, con lo cual la superficie entera del dispositivo puede emitir cualquier combinación de esos tres colores. Este OLED apilado puede sustituir a la clásica arquitectura que adoptan las pantallas de colores, en las que los tres píxeles (rojo, verde y azul) son adyacentes en una sola capa de la pantalla. Dos son los inconvenientes de esta disposición tradicional: primero, cada punto de la pantalla requiere al menos tres píxeles, lo cual limita la resolución, y, segundo, para visión muy cercana (la de una pantalla montada en casco) harían falta unos píxeles pequeñísimos para mantener la ilusión del pleno color.

La pantalla de OLED apilado salva este problema; cada píxel puede dar cualquier color deseado, lo que triplica la resolución de la pantalla, al tiempo que reduce los espacios oscuros entre píxeles. Por añadidura, al estar apilados verticalmente los tres colores, el conjunto ofrece pleno color a cualquier resolución o distancia de visionado, dado que el ojo humano no tiene que resolver píxeles contiguos.



LOS OLED (dispositivos fotoemisores orgánicos) transportan portadores de cargas opuestas a una región fotoemisora, en la que se emiten fotones de un color primario (*izquierda*). En el OLED apilado se superponen capas de cada uno de los tres colores en un solo encapsulado, lo que permite triplicar la resolución (*abajo*).

PAUL E. BURROWS, STEPHEN R. FORREST y MARK E. THOMPSON comenzaron a trabajar en pantallas orgánicas en la Universidad de Princeton, donde siguen los dos primeros. Thompson está en la Universidad de California del Sur.

y no aislante el material desprendido. Su opacidad produce una pérdida de luz, y su conductividad podría originar cortocircuitos en la célula.

Un esforzado grupo de San Petersburgo ha desarrollado otra interesante pantalla de corriente continua. Su estructura, más sencilla, se caracteriza por estar construida en mosaico, con losetas cuadradas de 20 centímetros que contienen 64 × 64 píxeles. Las líneas de los bordes, finísimas, permiten que las losetas se yuxtapongan sin que apenas se perciban las junturas. Cada loseta recibe una excitación independiente; por tanto la luminancia de la pantalla es independiente de su tamaño, no como en la pantalla de NHK donde la luminancia es inversamente proporcional al número de filas. Podrían construirse pantallas muy grandes sobre estos principios.

El problema fundamental que plantea la pantalla matricial es que requiere múltiples circuitos de excitación: uno por fila y columna, más los circuitos de control que han de activar los electrodos en el momento oportuno. El problema se exacerba en las pantallas de plasma por ser altas las tensiones requeridas (100 volts, que es mucho para microcircuitos). Además, los circuitos deben hallarse preparados para admitir el impulso de corriente, breve aunque intenso, que se produce al principio de cada ciclo de descarga. De ahí que el coste de los circuitos de excitación de las pantallas de plasma sea más elevado

La competición

En la carrera en pos de imágenes grandes, los paneles visualizadores de plasma (PDP) van en cabeza. Pero hay multitud de competidores en constante mejora. Veamos una selección de los principales.



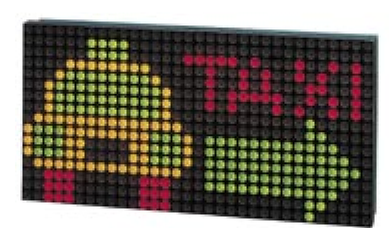
Proyectores. Aunque las pantallas de proyección no se cuelgan en la pared, se obtienen con ellas imágenes grandes; son, pues, competidores. La imagen del proyector puede proceder de tres tubos de rayos catódicos monocromos de 180 a 230 milímetros de diámetro, o bien de una fuente luminosa de alta intensidad que envía luz a través de una o varias válvulas de luz, en realidad transparencias electrónicas. Los proyectores resultan engorrosos comparados con las pantallas de plasma, y además están lejos de cumplir los requisitos de la televisión de alta definición (TVAD).

Tubos de rayos catódicos. Grandes, pesados y devoradores de energía, los tubos de rayos catódicos utilizan una técnica consolidada y en progreso. En la limitación de tamaño se halla su mayor inconveniente: aunque es posible construir modelos de más de 900 milímetros de diagonal, no acaban de verse sus aplicaciones. La TVAD requiere imágenes de más de 1000 milímetros.

Pantallas de cristal líquido (LCD). El ordenador portátil ha creado una enorme demanda de las LCD. La industria ha respondido produciendo pantallas de resolución, ángulo de visión, calidad de colores y rendimiento cada vez mejores y más baratos. El tipo preferible es el de matriz activa, que incorpora en cada célula un conmutador electrónico (un transistor de lámina fina); esta configuración, aunque encarece el producto, mejora el comportamiento con respecto a las pantallas pasivas. Se está trabajando en pantallas mayores —Sharp ha presentado una en color de 1015 milímetros de diagonal— pero el coste crece espectacularmente con la superficie de la pantalla. Los ángulos de visión no están tan limitados como antaño, pero las LCD siguen reproduciendo con dificultad las imágenes móviles porque el material es lento en la conmutación.

Una interesante combinación es la LCD direccionada por plasma, que inventara Tektronix y ahora desarrollan Sony, Sharp y Philips. La selección de filas se realiza por medio de canales estrechos llenos de gas; el gas se ioniza fila por fila; controlando la tensión en los electrodos de columna, como en las LCD tradicionales, se consigue la modulación de las células individuales. Los canales de plasma son menos caros que los transistores de lámina fina; de ahí el interés de este sistema para las grandes pantallas. En exposiciones comerciales se han presentado paneles de 1065 milímetros. Su luminancia es excelente, aunque la reproducción de imágenes en movimiento rápido evidencia las dificultades usuales en LCD, y el ángulo de visión está más limitado que en algunas LCD más avanzadas.

Diodos fotoemisores (LED). En estos dispositivos semiconductores los electrones y los huecos (ausencias de electrones) se inyectan en una región donde pueden combinarse, emitiendo luz (y calor). Una vez conseguidos los LED azules tras un largo y costoso desarrollo, se han construido ya pantallas a todo color. Contienen éstas miles de píxeles, cada uno compuesto de un LED rojo, uno verde y uno azul. Pueden medir va-





3. ESTA PANTALLA DE PLASMA mide en diagonal 1056 milímetros. Su espesor no pasa de 150 milímetros, pesa 40 kilogramos y puede reproducir 16,7 millones de colores.

que en muchas otras técnicas de visualización, aunque sin duda descenderá con la producción en masa.

Otro problema remanente de las pantallas de plasma es que el bombardeo iónico tiende con el tiempo a destruir los fósforos, reduciendo su emisión de luz; ese fenómeno ha limitado la vida útil a unas 10.000 horas, aunque ahora algunos fabricantes reivindiquen las 30.000 horas (hasta una luminancia mitad de la inicial). Para alargar la vida útil suele recurrirse a mantener la descarga separada del fósforo.

El rendimiento y la luminancia de las pantallas de plasma por corriente alterna podría también mejorarse algo. Los rendimientos actuales son del orden de un lumen por watt, y van en aumento. Las luminancias superan fácilmente las 100 candelas por metro cuadrado. Al menos un fabricante afirma haber conseguido

rios metros y emitir brillo suficiente para visión en pleno día. Su elevado coste, sin embargo, limita su empleo a las plazas públicas, centros comerciales y lugares análogos.

No ha sido posible construir grandes matrices de LED en semiconductores de compuestos monocristalinos. Sin embargo, los LED orgánicos podrían modificar esta situación.



Electroluminiscencia. En esta técnica se utiliza una delgada película de fósforo emparedada entre capas de aislante. La aplicación de una tensión al conjunto genera electrones en la interfaz entre aislante y fósforo; esos electrones producen luz de manera muy semejante al bombardeo de las capas de fósforo en un tubo de rayos catódicos. Las pantallas electroluminiscentes de película delgada son resistentes, ofrecen ángulos de visión amplios y duran. Pese a su gama limitada de colores y su tamaño han tenido cierto éxito en algunos sectores. El desarrollo de polímeros orgánicos electroluminiscentes podría dejar sentir su influencia en esta técnica.



Pantallas de emisión de campo. Se demostró hace más de 20 años que unas tensiones moderadas aplicadas a puntos muy determinados de una muestra de molibdeno u otro metal refractario producían un campo eléctrico de intensidad suficiente para robar electrones del metal a temperatura ambiente. Estos emisores de electrones de cátodo frío podían ser la base de un dispositivo similar al tubo de rayos catódicos, con uno o más cátodos para cada píxel. Pero, ¿cómo construir los cátodos?

Desde entonces, los progresos en las técnicas y los materiales para fabricación de semiconductores han realzado mucho el interés por tales dispositivos. PixTech los produce a escala comercial. Se están investigando otros prototipos.

Canon ha anunciado un tipo de cátodo capaz de transformar estas pantallas en un producto más comercial. En vez de incrustar silicio monocristalino en puntos microscópicos, el cátodo de emisión por conducción superficial de Canon lanza electrones al vacío desde el hiato estrecho que hay entre dos electrodos impresos sobre un sustrato de vidrio. Si este dispositivo satisface las expectativas, podrían producirse cátodos casi de cualquier tamaño por impresión a chorro u otro medio similar.

Aunque quedan problemas por resolver, la pantalla de emisión de campo podría muy bien competir con la LCD en tamaños pequeños, y quizá tenga más oportunidades que la LCD para desafiar abiertamente a la pantalla de plasma en el campo de las pantallas grandes.

Pantallas fluorescentes en vacío. Basada en una vieja idea, esta pantalla viene a ser un tubo de rayos catódicos plano de baja tensión. Unos cátodos filiformes emiten electrones a baja temperatura, que se encaminan hacia capas de fósforo capaces de emitir luz a baja tensión con buen rendimiento. Los píxeles que han de iluminarse se seleccionan mediante rejillas de malla metálica interpuestas entre cátodos y fósforos. Las pantallas fluorescentes en vacío se utilizan a menudo en indicadores horarios (en automóviles), aparatos de cocina y numerosos magnetoscopios. Pero los intentos de aplicar esta técnica a las grandes pantallas han resultado infructuosos.



—A.S.

300 candelas por metro cuadrado: cerca de las 350 candelas por metro cuadrado que suele considerarse requisito mínimo para televisores de consumo. (En general las pantallas de televisión deben tener mayor brillo que las de ordenador, porque suelen contemplarse desde mayores distancias que los monitores de ordenador y deben verse con nitidez aun con intensa luz ambiente.)

Aunque la luminancia de las pantallas de plasma, tanto las de corriente alterna como las de corriente continua, es ya suficiente para numerosas aplicaciones, todavía no llega a la de los tubos de rayos catódicos. Para aumentar la luminancia lo más sencillo es elevar la potencia; por desgracia, esto dispara el coste de los circuitos de excitación y de las fuentes de alimentación. Es, pues, continua la demanda de un rendimiento mayor. Dos posibilidades se están investigando en el desarrollo: conseguir más fotones útiles de la descarga y aprovechar mejor estos fotones ultravioleta en las células para producir luz visible.

Como en cualquier técnica que logre comercializarse, el éxito de una pantalla requiere a un tiempo la invención de un dispositivo y la invención y mejora de métodos de fabricación. Ambas exigencias son inseparables. Si en algo se distinguen las compañías japonesas que lideran estos desarrollos es en poseer la voluntad y los medios necesarios para invertir en técnicas de fabricación durante largos períodos.

Es muy interesante trabajar en el desarrollo de pantallas. Siguen apareciendo nuevas técnicas, incluso cuando mejoran las antiguas. El interés también proviene de que los visualizadores de pantalla son componente esencial de casi todos los sistemas. Ya sea para lavar ropa o controlar un lanzamiento de satélite, un equipo ha de interactuar con seres humanos, y en esa relación resulta imprescindible disponer de una buena pantalla.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

FLAT-PANEL DISPLAYS AND CRTS. Preparado por Lawrence E. Tannas, Jr. Van Nostrand Reinhold, 1985.

ELECTRO-OPTICAL DISPLAYS. Preparado por Mohammad A. Karin. Marcel Dekker, 1992.

DISPLAY SYSTEMS: DESIGN AND APPLICATIONS. Preparado por Lindsay W. MacDonald y Anthony C. Lowe. Serie SID de técnicas de visualización. Publicado en asociación con la Sociedad para la Visualización de la Información. John Wiley & Sons, 1997.

Advenimiento de la televisión digital

Tras un largo y controvertido proceso, se dispone por fin de un estándar digital. Muy pronto, el sistema actual de televisión será historia

Jae S. Lim

Dentro de escasos meses, la televisión norteamericana sufrirá un cambio radical, similar al operado con la llegada del color. En noviembre comenzará a emitirse por técnicas digitales en las grandes áreas metropolitanas, esperando recibir imágenes y sonido de calidad mucho mejor que la ofrecida por el sistema actual. Esta nueva televisión digital presenta, además, numerosas propiedades de las que carece la televisión tradicional. Pensemos, por ejemplo, en los canales auxiliares para datos y la facilidad de conexión a ordenadores y redes de telecomunicación.

El cambio a la nueva modalidad digital desde el sistema vigente, establecido en los años cuarenta y cincuenta por la Comisión Nacional de Sistemas de Televisión (NTSC), ha seguido un proceso lento, a menudo muy controvertido. Se han necesitado muchos años de competición y cooperación entre las principales organizaciones. Funcionarios de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), cadenas emisoras de televisión, fabricantes y académicos intentaban elaborar un estándar digital que no dejara inmediatamente anticuados los televisores existentes. Todavía hay que perfilar ciertos detalles, especialmente los que afectan a la introducción de informática en el dominio de la televisión.

Entre tanto, la situación internacional sigue confusa. Si Canadá y la República de Corea se han comprometido a adoptar el nuevo estándar estadounidense, en la mayor parte de Asia, Europa e Iberoamérica está sujeto a examen al par que otras posibilidades.

Pero ya se han sosegado las aguas, y los progresos en comunicaciones, proceso de señales e integración a muy grande escala han permitido revisar a fondo el sistema de televisión enraizado en técnicas de hace medio siglo. El nuevo sistema operará, sobre todo, en canales de la banda de 470 a 890 megahertz (canales 14 a 83), en frecuencias ultraelevadas (UHF). El



JAE S. LIM enseña ingeniería eléctrica e informática en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Allí dirige el programa de investigación en telecomunicaciones avanzadas, principalmente dedicado a proceso digital de señales y sus aplicaciones al proceso de imagen, vídeo, audio y voz. Lim ha participado en los trabajos del ente federal norteamericano que entiende de la normalización de televisión avanzada, la FCC.

sistema nuevo y el antiguo coexistirán hasta el 2006, en el que deben cesar las emisiones de señales NTSC, tanto en la banda de 54 a 216 megahertz (canales 2 a 13) en frecuencia muy alta (VHF), como en la banda de UHF. La FCC reasignará entonces dichos canales a la TV digital, o a otros servicios como las comunicaciones inalámbricas.

La FCC no ha abdicado nunca de su autoridad sobre las normas técnicas para los medios de radiodifusión terrestre. Su influencia se extiende también a los operadores de cable y satélite, que podrían adoptar las normas de la radiodifusión terrestre y así ahorrarse confusión, gastos y complejidad técnica adicionales. Lo que complica la situación, sin embargo, es que ciertos operadores de cable y de satélite han comenzado ya a emitir señales digitales, aunque no en formato de alta definición. Habrá que solucionar este asunto, si se quiere que los operadores de radiodifusión, cable y satélite coexistan en armonía técnica.

La televisión llega al nuevo sistema en su afanosa búsqueda de imágenes mejores, iniciada antes de la era digital. Al final de los sesenta, NHK, la emisora estatal japonesa, hizo su primera incursión en la televisión de alta definición (TVAD). Juntamente con otros fabricantes japoneses, NHK desarrolló un sistema analógico, el MUSE, para codificación *sub-nyquist* múltiple. Esta codificación suministraba una información cinco veces mayor, que producía una imagen más nítida. Pero su transmisión exigía una banda de frecuencias multiplicada por cinco. Así, frente al sistema NTSC que transporta señales de audio y vídeo dentro de un canal de seis megahertz, el MUSE requería un canal de 30 megahertz de anchura de banda.

En los primeros días del NTSC sobraba anchura de banda. Sin embargo, cuando apareció el MUSE ya no quedaba espacio suficiente en el espectro para admitirlo. Para nuestros patrones actuales, el método NTSC no sabe sacarle partido a la anchura de banda. En la mayoría de los casos, las señales de vídeo varían muy poco al pasar de un elemento de imagen (píxel) a los contiguos, o por lo menos existe una dependencia entre ellas. En NTSC se transmiten escenas enteras sin aprovecharse de esa dependencia, por lo que se envía una y otra vez información redundante. Este uso derrochador del espectro genera interferencias entre las distintas señales NTSC. Al crecer el número de estaciones transmisoras, la interferencia se convertía en un grave problema.

La solución fue dejar sin utilizar algunos canales, llamados "tabú". En los EE.UU. sólo se ha asignado uno de cada dos canales de VHF y uno de cada seis canales de UHF. Por otro lado, los servicios de telecomunicación, móviles o de otro tipo, también requerían utilizar la banda disponible. En resumen, no era posible acomodar en el espectro de los EE.UU. sistemas de TVAD consumidores de ancho de banda.

A petición de las organizaciones de radiodifusión, la FCC creó en 1987 una comisión asesora sobre servicios de televisión avanzada (ACATS). Debía asesorar a la FCC sobre normalización del servicio de televisión avanzada en los EE.UU., incluida la preparación de un estándar técnico. En 1988 la ACATS solicitó a las industrias, universidades y laboratorios de investigación que propusieran normas para televisión avanzada.

Mientras que la ACATS examinaba las propuestas y preparaba los laboratorios para una evaluación técnica formal, la FCC dio un paso fundamental. En marzo de 1990 decidió que el servicio de televisión avanzada se prestaría en modo de difusión simultánea ("simulcast") con el convencional, y no en régimen de compatibilidad de receptores.

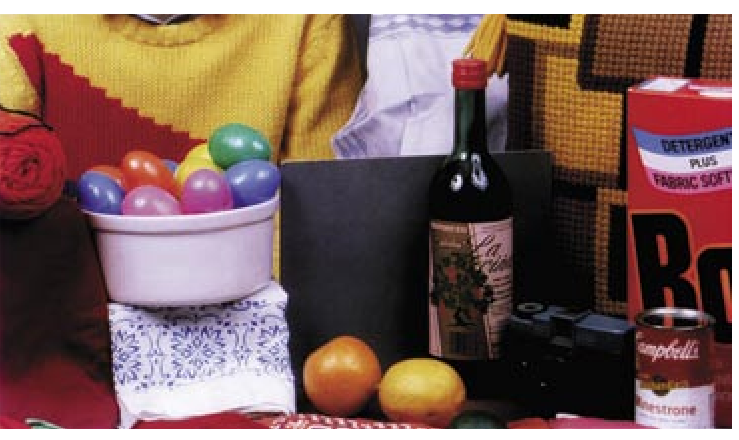
Según el último enfoque, la señal de TVAD podría captarse en los receptores de televisión actuales, generando una imagen visualizable. Al introducir el color, la NTSC siguió ese método, con el fin de mantener en uso los televisores en blanco y negro existentes. Esto pudo hacerse porque la información de color no exigía una gran anchura de banda. Una pequeña parte del canal de seis megahertz se asignaba al color sin mermar la calidad de la imagen en blanco y negro.

1. EN LOS PREPARATIVOS de emisión para la televisión digital (DTV) como los aquí desplegados por la WRC-TV (*página anterior*), se incluyen cámaras de televisión digital, aparatos de mayor anchura y accesorios de alta calidad. La DTV ofrece una imagen nítida, de alta definición (TVAD) y una relación de aspecto (anchura/altura) mayor que el sistema actual, como muestra la comparación simulada (*abajo*).

TV EXISTENTE



TV DIGITAL



Esquivar una decisión difícil

Aunque el nuevo estándar adoptado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) sobrepase los requisitos iniciales de un sistema de televisión digital y pueda mantenerse en los años venideros, su éxito final depende de ciertas decisiones que la FCC deja en manos del mercado. La norma es flexible. No sólo permite los seis formatos de transmisión que la Gran Alianza propuso, sino otros formatos adicionales, fruto de un compromiso entre compañías con preferencias dispares. Para comprender las consecuencias de esta decisión, conviene repasar las diferencias entre la exploración entrelazada y la exploración progresiva, que viene a sustituirla.

La exploración entrelazada es la base del estándar de la NTSC. Las imágenes suministradas son instantáneas de una escena tomadas determinado número de veces por segundo, formadas por las líneas pares e impares, alternantes, en que se descompone la imagen a efectos de exploración. A una instantánea formada sólo por líneas impares le sigue otra que consta de líneas pares; después se repite la secuencia. Cada instantánea —par o impar— se denomina trama.

Pese a no ver más que una serie de instantáneas de una escena, el ojo humano da continuidad al movimiento. En el sistema NTSC, las tomas se proyectan a razón de 60 tramas por segundo (30 imágenes completas). A esa velocidad el espectador funde las imágenes y percibe un movimiento continuo, sin notar parpadeos en la pantalla. El número total de líneas activas es de unas 480, con 420 píxeles por línea. (El número de líneas representa la resolución espacial vertical de la imagen; el número de píxeles por línea, la resolución espacial horizontal.)

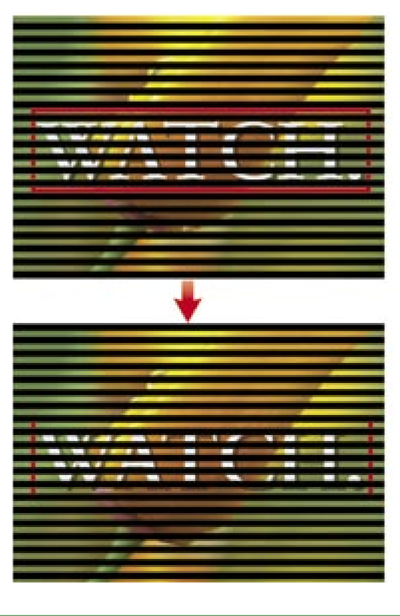
Como alternativa a la exploración entrelazada, en la exploración progresiva se analizan sucesivamente todas las líneas de cada instantánea, denominada cuadro. El tipo de exploración no resultó práctico para el método NTSC. Por limitaciones de la anchura de banda, no puede explorarse a más de 30 cuadros por segundo, y eso provocaría el parpadeo de la imagen. Podría éste evitarse si cada cuadro que se explora progresivamente se visualizara dos veces, pero ello exigiría una memoria de cuadros, técnica desconocida cuando se normalizó el NTSC. De ahí que se impusiera el entrelazado en la industria. A partir de entonces, el equipo de vídeo de TVAD, incluidas las cámaras, se ha desarrollado pensando en la exploración entrelazada.

Por desgracia, el entrelazado introduce perturbaciones en vídeo, como el parpadeo entre líneas. Aunque no suelen estorbar mucho en imágenes recreativas, sí pueden ser rechazables cuando se visualizan textos, gráficos informatizados u otro material que contenga líneas finas. Supóngase una fina línea horizontal que está en la trama impar y no en la trama par. La frecuencia de exploración total es de 60 hertz, pero esa línea horizontal se explora sólo 30 veces por segundo y, por tanto, parpadea. Por eso casi todos los monitores de ordenador recurren a la exploración progresiva. Es posible desentrelazar una señal de manera que pueda visualizarse en un monitor de exploración progresiva, pero la conversión requiere un complejo proceso de la señal para conseguir un alto rendimiento. Y la calidad de la imagen no es la que se obtiene con una transmisión realizada sobre un formato de exploración progresiva. No es de extrañar, pues, que la industria informática defienda la exploración progresiva, que les ayudaría a ejercer un mayor influjo en la industria de la radiodifusión televisiva y el mercado doméstico en general. También la defiende la industria cinematográfica, que desea mejores pantallas para sus películas.

El desacuerdo en torno a los formatos levantó mucho ruido y retrasó la televisión digital. El sistema de TVAD de la Gran Alianza proponía cinco formatos de exploración progresiva y uno de exploración entrelazada. Para acomodarse a la definición normalizada, la recomendación del Comité Asesor para Servicios de Televisión Avanzada (ACATS) especificó 12 formatos adicionales que contenían exploración progresiva y entrelazada. Por fin, en diciembre de 1996, la FCC adoptó el compromiso alcanzado entre las industrias de informática y de radiodifusión visual. Este acuerdo suprimió casi todas las restricciones de formatos de transmisión; no sólo se admitían los 18 formatos propuestos que incluían exploración entrelazada, sino que además permitía muchos formatos adicionales progresivos y entrelazados. De hecho, esta decisión confiaba la elección de los formatos de transmisión a las fuerzas del mercado.

Existen razones poderosas para permitir múltiples formatos de transmisión. Un sistema de televisión tiene que admitir distintas fuentes de vídeo: videocámaras, películas, medios magnéticos y ópticos, imágenes sintetizadas y otros, cada una de ellas con su propia clase de formato. En el sistema NTSC, que utiliza un formato de transmisión único, las fuentes de entrada se convierten a ese formato

ENTRELAZADA



La señal de TVAD requiere, sin embargo, mucha más información que una señal de color. Por tanto, el requisito de compatibilidad del receptor exigiría un canal suplementario para transportar la información adicional que comporta la TVAD; en términos básicos, otro canal de seis megahertz.

Esto plantea varios problemas importantes. Primero, al transmitirse la señal de TVAD por un canal NTSC, este sistema ineficaz no podrá convertirse en un sistema técnico moderno y rentable. Segundo: se exige la asignación permanente de un canal nuevo por cada canal NTSC existente.

Por los motivos apuntados, la FCC adoptó el enfoque de difusión simultánea (“simulcast”). A diferencia del caso de compatibilidad del receptor, donde la señal de TVAD se obtiene de la señal NTSC y la información adicional va por el canal suplementario, la señal TVAD en difusión simultánea se transmite por un canal propio de seis megahertz, con independencia de la señal NTSC. De esta manera, podría equiparse un sistema

y se transmiten después. Por ejemplo, el formato de una película es de 24 cuadros por segundo, y ha de convertirse a 60 tramas por segundo con exploración entrelazada (el formato NTSC), tras lo cual se transmite. Con todo, el uso de un formato de transmisión único derrocha espectro disponible.

Para comprender el porqué, pensemos en una emisión de cine. Cada nuevo canal es capaz de transmitir 60 cuadros por segundo (a 720 líneas de exploración progresiva). La película se ha filmado a 24 cuadros por segundo, de modo que sólo se necesita utilizar alrededor de la mitad de la anchura de banda (la parte desocupada podría contener otra película más en TVAD, datos de ordenador u otro programa). La imposición de un formato único implica que la película habrá de transmitirse a 60 cuadros por segundo — en otras palabras, cada cuadro se enviaría dos o tres veces, y quedaría menos espacio para otros datos. El espectro se ocuparía con datos repetitivos.

Si se autoriza la multiplicidad de formatos, podrán emplearse distintos formatos para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, un formato que ofrezca alta resolución para las transmisiones deportivas. Por otro lado, un programa de noticias podrá elegir un formato de resolución algo menor y utilizar la capacidad de canal ahorrada para transmitir otro programa más.

Al admitir el nuevo estándar muchos formatos de transmisión diferentes, será posible transmitir en vídeo con un formato idéntico o muy similar al de la fuente original. Desde el punto de vista de eficacia del espectro, lo ideal sería permitir todos los formatos de vídeo posibles.

Pero mirado desde el extremo receptor —el televisor del cliente—, un excesivo número de formatos puede resultar caro y engorroso. Generalmente el monitor visualiza las imágenes en un solo formato, al cual habría que convertir todos los diferentes formatos que se recibieran. Y si éstos fueran muchos, la conversión se complicaría. En cualquier caso, la mayoría de los beneficios derivados de los formatos múltiples pueden conseguirse seleccionando con cuidado un pequeño grupo de formatos.

Probablemente todas las pantallas nuevas en un futuro no muy lejano van a ser progresivas, dada la superior calidad de operación de este formato. Pero la decisión de la FCC permitiendo ambos formatos progresivo y entrelazado en el trayecto de transmisión deja la opción a las cadenas emisoras. Si éstas transmiten con exploración progresiva, en los receptores podrán equiparse con muy poco coste adicional tanto pantallas de exploración progresiva como de exploración entrelazada. Ello se debe a que la conversión de progresiva a entrelazada se realiza bien con un proceso digital sencillo. Se espera que todo receptor digital incorpore esta capacidad. Pero si se emite en exploración entrelazada, el receptor de exploración progresiva habrá de convertir el formato entrelazado. Esta operación de desentrelazado requiere un complejo proceso de señal para conseguir una buena calidad, lo que eleva el coste de las pantallas de exploración progresiva, actualmente ya más caras que las de exploración entrelazada.

A las emisoras les conviene transmitir señales entrelazadas, ya que ahora es más fácil conseguir cámaras y equipos de producción que sigan este tipo de exploración. Además, existen grandes fondos de material en vídeo grabado en formato entrelazado.

Al permitir formatos entrelazados en el trayecto de transmisión, la FCC viene a exigir que se incorporen desentrelazadores en todos los receptores de exploración progresiva (a menos que las entidades emisoras eviten formatos entrelazados). Sería preferible equipar desentrelazadores en los transmisores, cuyo número es muchísimo menor. Por añadidura, los desentrelazadores funcionan mucho mejor en el transmisor que en el receptor, porque el transmisor tiene acceso al vídeo sin codificar original.

Toda norma se propone proteger el interés general. Tomando como ejemplo la compresión de vídeo, los receptores de televisión digital sólo necesitan aplicar el método de descodificación apropiado para el método de compresión de vídeo adoptado por la FCC. En el caso de los formatos de transmisión, sin embargo, la FCC evitó pronunciarse. La decisión la tomarán las fuerzas del mercado. La industria de radiodifusión visual y el público pueden así quedarse atados a los formatos entrelazados y sus equipos asociados por mucho más tiempo que si la FCC hubiese tomado la difícil decisión de limitar las opciones a los formatos de exploración progresiva, a largo plazo los preferidos. *J.S.L.*

PROGRESIVA



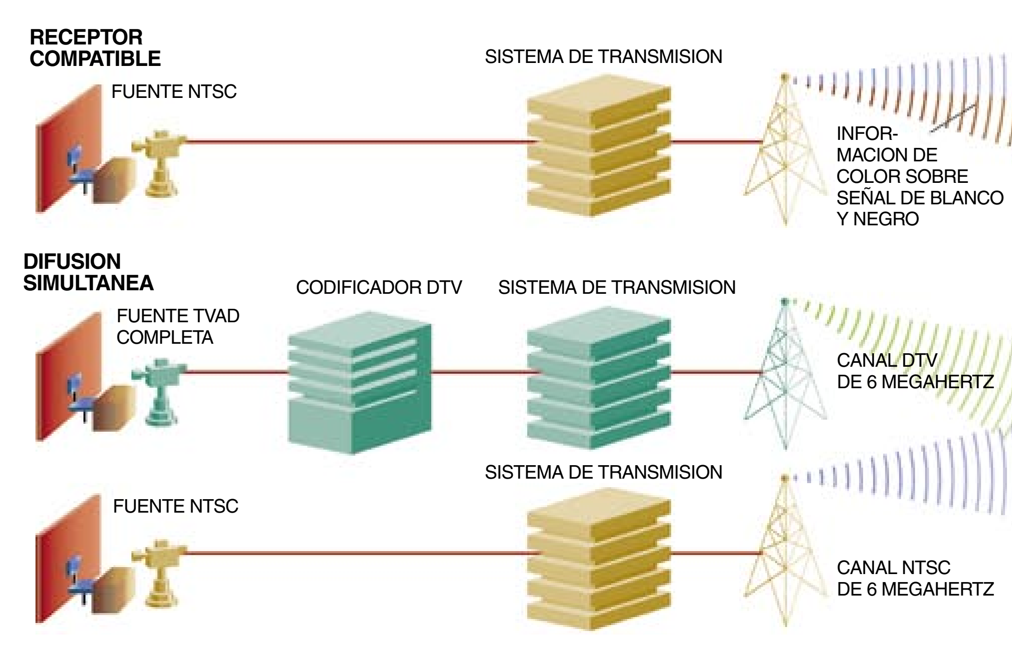
EL PARPADEO interlineal se produce en la exploración entrelazada cuando las líneas finas (las rojas que enmarcan "WATCH") caen sobre líneas de exploración individuales. En la exploración de líneas impares (*izquierda, arriba*), no se ven las porciones de imagen que caen sobre líneas pares, y en la exploración siguiente (líneas pares) sucede lo contrario (*izquierda, abajo*). En consecuencia, el ojo nota un parpadeo. En exploración progresiva (*derecha*) todas las líneas se exploran en cada imagen, y no existe parpadeo interlineal.

de transmisión moderno para la señal de TVAD completa.

El inconveniente estriba, sin embargo, en que los televisores actuales no pueden recibir una señal de TVAD. Para garantizar que no se queden de repente inservibles, la FCC asignó un nuevo canal por servicio de TVAD a cada una de las 1500 estaciones de EE.UU. que lo solicitasen. Durante un período de transición la FCC exigía que el mismo programa fuera emitido simultáneamente, o con muy poco retraso, por ambos canales (TVAD y NTSC), de ahí el nombre de "simulcast". (Más tarde se suprimió el requisito.) Cuando una gran parte del país ya utilizase la TVAD, el servicio NTSC cesaría. La porción del espectro que hubiera ocupado se utilizaría para nuevos canales de TVAD u otros servicios.

La difusión simultánea ofrece numerosas ventajas. Permite el diseño de una señal de TVAD nueva, de alta eficacia espectral, que requiere bastante menos potencia e interfiere mucho menos con otras señales, entre ellas la de NTSC. También admite

2. LAS ALTERNATIVAS de transmisión de DTV se centraban en cómo debían los televisores recibir a la vez las señales nuevas y las de NTSC existentes. Para introducir el color se había aplicado la alternativa de receptores compatibles, transmitiéndose la información de color en el canal de seis megahertz. Ahora bien, la señal de alta definición y la de NTSC no caben juntas en un canal; por eso la FCC adoptó como solución la difusión simultánea, que exige transmitir de consuno ambos tipos de señales.



los canales tabú. (Si no hay canales tabú la FCC no puede asignar un canal adicional destinado a TVAD a cada emisora de NTSC.) Además, con difusión simultánea se eliminan los canales NTSC de bajo aprovechamiento espectral, transcurrido el período de transición. Por añadidura, la supresión de señales NTSC muy sensibles a la interferencia permite utilizar con mayor rendimiento otros canales. La medida adoptada por la FCC en 1990 tuvo una repercusión decisiva en el proceso de normalizar la TVAD.

Muy poco después, comenzaron a recibirse propuestas de sistemas TVAD basados en el modo de difusión simultánea. Por último, la ACATS de la FCC aprobó someter a evaluación formal cinco propuestas. Una de ellas propugnaba un sistema analógico; las cuatro restantes, sistemas digitales. Los cinco sistemas se evaluaron en el Centro de Pruebas de Televisión Avanzada de Alexandria, mientras que el Laboratorio de Evaluación de Televisión Avanzada de Ottawa juzgaba subjetivamente la calidad de la imagen.

En febrero de 1993, se revisaron los resultados de las pruebas en una sesión especial de ACATS. La conclusión fue que los cuatro sistemas digitales superaban en prestaciones al sistema analógico; a su vez, cada uno de los cuatro sobresalía en diferentes aspectos. No podía, pues, pronunciarse por uno determinado. Se recomendó, en cambio, probar de nuevo cada sistema digital, tras oportunas mejoras introducidas por los proponentes. La ACATS aceptó la recomendación anterior, sin dejar de animar a estos promotores para que reunieran en un solo sistema los elementos mejores de los cuatro y lo sometieran a evaluación.

Recogieron el guante y se pusieron a trabajar en un mismo sistema. En mayo de 1993 constituyeron la Gran Alianza, consorcio integrado por AT&T, Zenith, el Centro de Investigación de David Sarnoff, General Instrument Corporation, el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Philips Electronics North America y la francesa Thomson Consumer Electronics. Entre 1993 y 1994 la Gran Alianza eligió los mejores elementos técnicos de los cuatro sistemas e introdujo mejoras en ellos. Con base en el prototipo de TVAD preparado por la Gran Alianza, la Comisión de Sistemas deTelevisión Avanzada (consorcio de industrias) elaboró un estándar técnico.

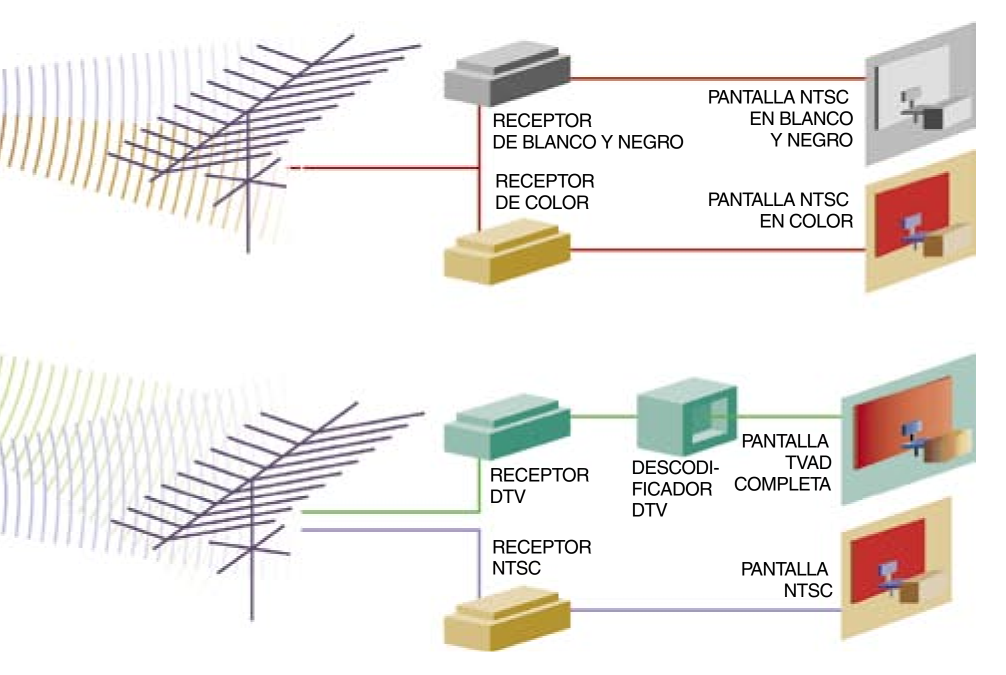
Para poder transportar en un canal de seis megahertz (que trata unos 20 millones de bits por segundo) toda la información que encierra una imagen de alta definición, es preciso comprimir los datos. (Si no se comprimieran, la imagen necesitaría alrededor de mil millones de bits por segundo.) La propuesta de la Gran Alianza se apoya en el sistema MPEG-2 (siglas en inglés de Grupo de Expertos para Imágenes en Movimiento). La clave de la compresión según MPEG consiste en no enviar las imágenes completas, como lo hace el sistema NTSC actual, sino sólo los cambios dentro de tales imágenes. Por ejemplo, en un noticiario no se enviarían repetidamente imágenes de la mesa o del fondo, que no acusan variación, sino de los movimientos de otras partes no estáticas. El resultado es que se necesitan muchos menos datos para actualizar una imagen (por supuesto, con cierta frecuencia habrá que transmitir la imagen completa).

Los datos comprimidos de vídeo, audio y cualesquiera otros se multiplexan, es decir, se combinan en una sola sucesión de bits. El tren de bits resultante modula una onda electromagnética; la señal modulada se transmite por radiodifusión terrestre. En la recepción, otra antena capta la señal y la envía a un receptor; éste la demodula para obtener el tren de bits original. A su vez, el tren de bits se demultiplexa y se recuperan los datos comprimidos, que se descomprimen a continuación.

En noviembre de 1995 la ACATS recomendó a la FCC el estándar elaborado por la Comisión de sistemas de televisión avanzada. Esta lo aceptó, salvo en un detalle. La norma restringía a 18 los formatos de resolución de vídeo autorizados. La propia FCC suavizó esta restricción en diciembre de 1996.

A principios de 1997 la FCC añadió otras disposiciones en apoyo del nuevo estándar técnico; entre ellas, la asignación de canales. A partir del otoño que viene, las principales cadenas emisoras transmitirán señales de televisión digital en Boston, Los Angeles y Washington, D.C.

El sistema de televisión digital basado en dicho estándar será muy flexible. Dentro de una anchura de banda de seis megahertz podrá ofrecer espectaculares imágenes de alta resolución y sonido perimétrico multicanal. O bien transmitir varios programas de televisión cuya definición sea comparable con la de los programas actuales. Esta flexibilidad



ha hecho que el acrónimo del sistema TVAD (HDTV en inglés) se sustituya, en Estados Unidos, por el término DTV (televisión digital), de más amplio significado. Además, con esa nueva norma se cubrirá una zona más extensa con mucha menos potencia de emisión que la que alcanza el sistema NTSC.

Podrán incorporarse al estándar futuras mejoras técnicas. Por ejemplo, el MPEG-2 especifica sólo la sintaxis de los trenes de bits codificados y el proceso de descodificación. Esta libertad de acción admite cierta flexibilidad en el proceso de codificación, que podrá perfeccionarse sin modificar el estándar.

Los televisores actuales no pueden recibir la nueva señal y obtener de ella una imagen visionable. Caben aquí dos soluciones. Una obvia: comprar un televisor digital nuevo. En un comienzo los televisores digitales de pantalla grande apta para TVAD serán caros; pero se abaratarán cuando se masifique su venta.

Otra solución más económica consiste en añadir al receptor corriente un módulo descodificador, que convertirá la señal digital de televisión en señal analógica (NTSC en este caso). Aunque el espectador no perciba la resolución propia de la TVAD, la calidad de vídeo superará a la que tendría el mismo programa transmitido por un canal NTSC analógico.

La calidad de la recepción mejorará, aunque el televisor no sea digital. A diferencia de la señal analógica, afectada por efectos multitrayecto ("doble imagen"), ruido aleatorio ("nieve") y demás degradaciones, el vídeo digital será perfecto dentro de una zona de cobertura determinada o no habrá en absoluto imagen. En esta condición del todo o nada se asemeja a la música digital, donde no es posible leer discos compactos sucios o estropeados.

La elevada resolución espacial de un sistema de televisión digital permitirá un realismo mayor, apreciable en una pantalla grande. En el sistema NTSC, se recomienda una distancia de visión de unas siete veces la altura de la imagen para no percibir las líneas de la pantalla. Una pantalla de 60 centímetros de altura debería, pues, contemplarse desde 4,25 metros, por lo que en muchos hogares sería difícil colocarla. Y en razón de la distancia, el ángulo de visión sería de unos 10 grados.

Para una televisión digital de alta definición, la distancia de visión recomendada suele ser de tres veces la altura del cuadro, lo que da para el ejemplo anterior una distancia de 1,8 metros, que ya resulta práctica en casi todos los casos. Y al ser más ancha la pantalla, esa distancia permite un campo de visión más amplio y realista, en torno a los 30 grados.

Otra aportación del nuevo estándar es el aumento de la relación de aspecto (razón entre la anchura y la altura de la imagen). Para NTSC esta relación de aspecto se fijó en 4:3, como la de las películas de cine en la época del primer desarrollo del sistema. Desde entonces, el formato de las películas se ha ensanchado. Para reflejar ese cambio la televisión de alta definición presenta una relación de aspecto mayor, 16:9.

El sistema de televisión digital puede, además, ofrecer un sonido multicanal, de calidad de disco compacto, lo cual potencia la sensación visual. La multiplicidad de canales de audio permite conseguir el efecto de sonido perimétrico utilizado en las salas de cine. Esos canales también servirían para transmitir diferentes idiomas con el mismo programa de vídeo.

El nuevo sistema digital transformará la televisión de otro modo, quizá de mayor alcance. Hasta ahora el televisor constituía un aparato autónomo, un medio de distracción. Pero, además de una imagen mejorada y de múltiples programas, el sistema digital podrá admitir datos procedentes de los servicios de telecomunicaciones, suministrando cotizaciones de bolsa o correo electrónico, entre otras informaciones. La pantalla se utilizaría como videoteléfono, servicio de prensa o monitor de ordenador.

Ante la promesa de esa integración la industria informática se ha esforzado por entrar en un dominio dominado por las emisoras de televisión. Mucho queda todavía por dirimir entre los dos campos, pero la convergencia parece inevitable. Es casi seguro que en un futuro próximo el televisor será el centro doméstico para entretenimientos, telecomunicación e información. En último término, tal vez esta integración nos va a afectar mucho más que la superior calidad de imágenes y sonido aportada por la televisión digital.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TWO-DIMENSIONAL SIGNAL AND IMAGE PROCESSING. Jae S. Lim. Prentice Hall, 1990.

DIGITAL PICTURES: REPRESENTATION, COMPRESSION AND STANDARDS. Segunda edición. A.N. Netravali y B.G. Haskell. Plenum Press, 1995.

HDTV AND THE NEW DIGITAL TELEVISION. Informe especial en *IEEE Spectrum*, vol. 32, n.º 4, páginas 34-79 abril de 1995.

ATSC DIGITAL TELEVISION STANDARD. Advanced Television Systems Committee; 16 de septiembre de 1995.

El oncogén *vav*

La proteína Vav, tumorigénica, participa en los procesos de transmisión de señales que tienen lugar tras la activación de las células hematopoyéticas

Piero Crespo, Silvio Gutkind y Xosé R. Bustelo

La palabra "cáncer" describe un grupo muy heterogéneo de estados patológicos en que las células comienzan a multiplicarse sin control e invadir órganos vecinos. Hay más de un centenar de cánceres, resultado de la expansión incontrolada de alguna de las células que componen nuestro organismo. Pese a tamaña diversidad, todos comparten idéntico mecanismo: la pérdida de control de los genes responsables de que se produzca una ordenada proliferación celular.

Relacionados con el control de la división celular se hallan los protooncogenes y los genes supresores de tumores. Los protooncogenes determinan proteínas encargadas de activar la proliferación celular durante el desarrollo embrionario, morfogénesis, regeneración de células muertas, curación de heridas y otros. A los genes supresores de tumores compete mantener las células en estado de reposo o activar procesos apoptóticos en las células en división cuando se detectan anomalías en el ADN que se está replicando.

Para que se desencadene el proceso tumoral debe producirse la conjunción de lesiones genéticas en los protooncogenes y en los genes supresores. El protooncogén ha de sufrir una mutación que le convierta en *oncogén*, o forma activada del gen normal. Y se ha de producir otra mutación que inactive uno de los genes supresores, lo que acarrea la pérdida de la facultad de poner freno a la proliferación generada por el oncogén.

El descubrimiento del papel decisivo que oncogenes y genes supresores ejercían en los procesos tumorales promovió el estudio detallado de los genes implicados. Así se fueron aislando y caracterizando genes muy diversos cuya mutación originaba procesos de transformación celular. La caracterización de muchos de estos genes permitió conocer rutas de señalización esenciales para asegurar el control de la división y diferenciación celular.

Aquí nos ceñiremos a la función y la ruta de señalización del oncogén *vav*. La combinación de diversas líneas de investigación ha permitido descubrir que cifra una proteína esencial para la proliferación de ciertos linajes celulares hematopoyéticos. Se ha identificado el mecanismo de activación de Vav durante los procesos de señalización celular, así como los substratos y moléculas efectoras que median los efectos proliferativos y tumorigénicos de esta oncoproteína.

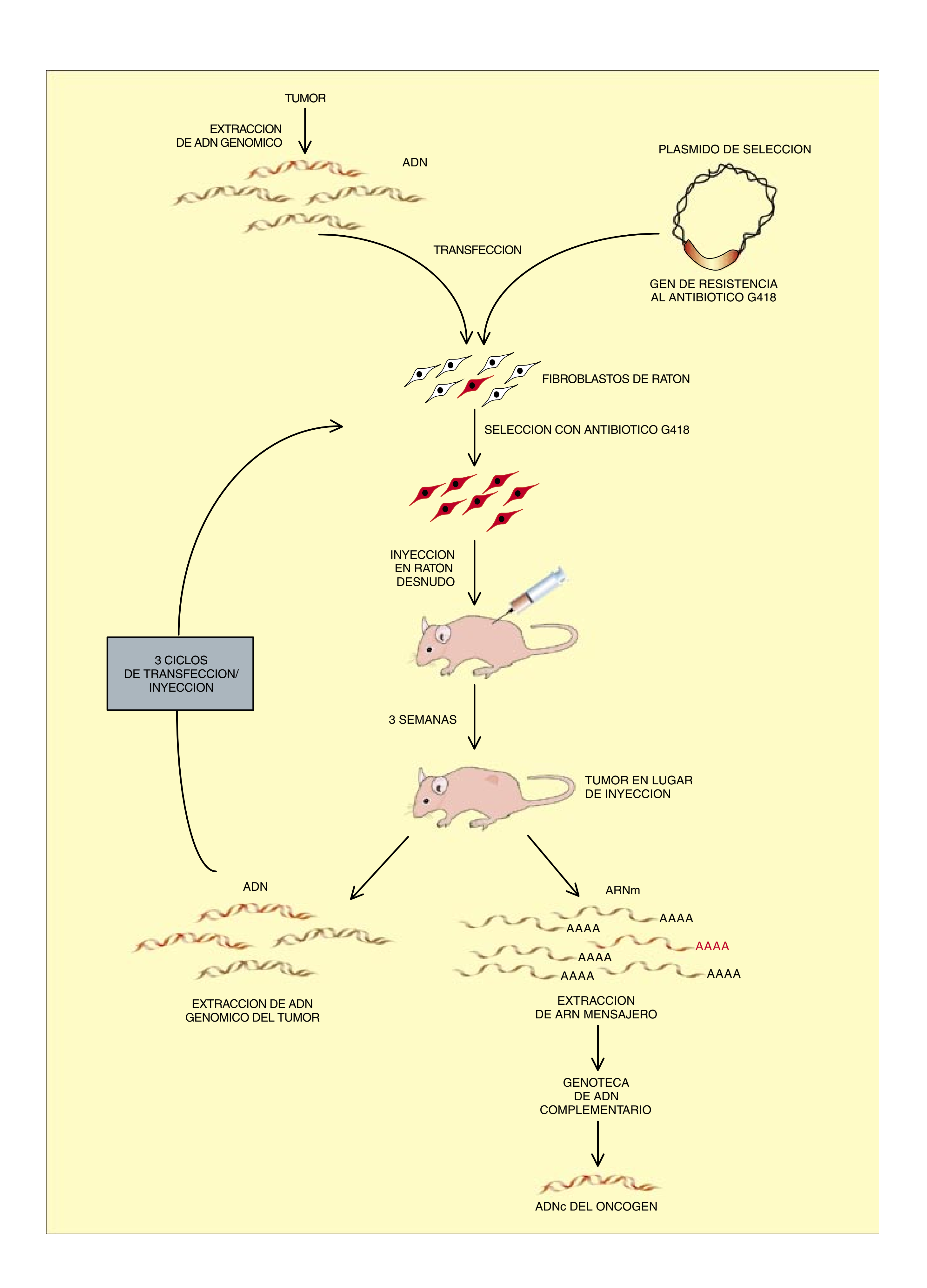
El oncogén *vav* se descubrió en 1989, cuando Shulamit Katzav se encontraba en el laboratorio de Mariano Barbacid investigando la presencia de oncogenes en tumores. Se acometía ese rastreo con técnicas de transferencia de ADN, basadas en la capacidad que poseen ciertas células cultivadas *in vitro* para integrar en su genoma ADN foráneo. Cuando esas células se incuban en presencia de ADN procedente de tumores, las que integran fragmentos de ADN con un oncogén incluido adquieren un fenotipo transformado; pasan de ser células de morfología plana y fusiforme, cuyo crecimiento se inhibe al entrar en contacto con otras células vecinas, a células que se dividen sin cesar.

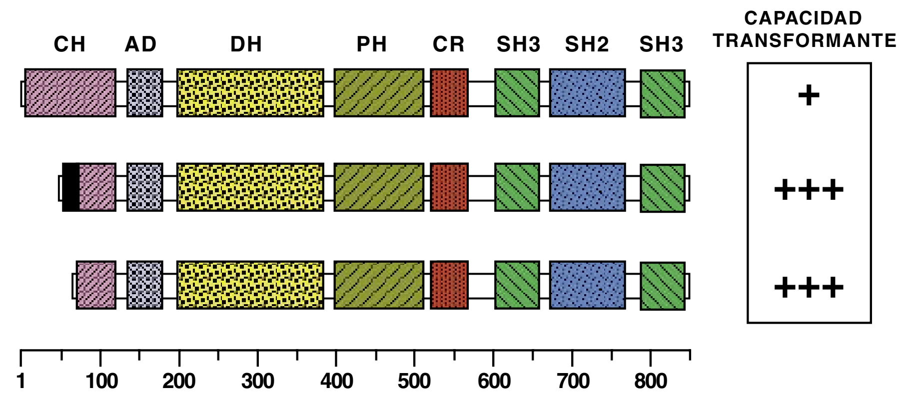
Cuando las células transformadas se inyectan en una raza especial de ratones (raza que carece de timo y, por tanto, de inmunidad ante células foráneas), inducen la aparición inmediata de tumores. Con tandas sucesivas de transferencia de ADN obtenidos de estos tumores inducidos se enriquece progresivamente el fragmento de ADN que contiene el oncogén, hasta eliminar regiones de ADN que no son transformantes.

Se logró, por fin, identificar una muestra de ADN que inducía la aparición de tumores en esos ratones. Una vez clonado el oncogén responsable

PIERO CRESPO, J. SILVIO GUTKIND y XOSE R. BUSTELO comenzaron a familiarizarse con el tema desarrollado en el artículo en sus años de posdoctorado en Estados Unidos. Crespo, adscrito al departamento de biología molecular de la Universidad de Cantabria, ha venido estudiando los mecanismos de transducción de señales en la diferenciación mieloide y la leucemia. Gutkind se halla en el norteamericano Instituto Nacional de Investigaciones Odontológicas y su campo de investigación se centra en la transducción de señales mediada por receptores acoplados a proteínas G y MAP quinasas. Bustelo es profesor de patología en la Universidad de Nueva York en Stony Brook, y sus investigaciones están centradas en la proteína Vav.

1. TECNICA DE "PESCA" DE ONCOGENES. A determinadas células de ratón, los fibroblastos, se transfiere ADN extraído de tumores humanos. Al propio tiempo se les transfiere un plásmido que confiere resistencia al antibiótico G418. Los fibroblastos portadores de ADN tumoral y plásmido se inyectan en ratones privados de timo. Las células del ratón que han captado un oncogén producirán un tumor sólido en el animal. Del tumor formado en el ratón se extrae ADN, que pasa por transferencia a los fibroblastos en cultivos. Este ciclo se repite hasta tres veces, para enriquecer el ADN oncogénico. Por último, mediante técnicas de ingeniería genética se extrae ARN mensajero del tumor para generar una genoteca de ADN complementario donde se identificará el oncogén humano.


TUMOR
EXTRACCION
DE ADN GENOMICO
ADN
PLASMIDO DE SELECCION
TRANSFECCION
GEN DE RESISTENCIA
AL ANTIBIOTICO G418
FIBROBLASTOS DE RATON
SELECCION CON ANTIBIOTICO G418
INYECCION
EN RATON
DESNUDO
3 CICLOS
DE TRANSFECCION/
INYECCION
3 SEMANAS
TUMOR EN LUGAR
DE INYECCION
ADN
ARNm
AAAA
AAAA
AAAA
AAAA
AAAA
AAAA
EXTRACCION DE ADN
GENOMICO DEL TUMOR
EXTRACCION
DE ARN MENSAJERO
GENOTECA
DE ADN
COMPLEMENTARIO
ADNc DEL ONCOGEN



2. ESTRUCTURA DE LA PROTEINA VAV y su capacidad oncogénica. La proteína silvestre, con poca actividad oncogénica, cuenta con numerosos dominios: uno de homología con calponina (CH), otro acídico (AD), de homología con Dbl (DH), de homología con pleckstrina (PH), rico en cisteínas (CR), dos dominios de homología con src SH3 y uno de homología con src SH2. Desconocemos la función que cumplen la mayoría de esos dominios. En los procesos que llevaron a la identificación de Vav el protooncogén se recombinó en su región proximal con una región del plásmido usualmente empleado en los procesos de transferencia génica. En el transcurso de esa recombinación, se eliminaban los 61 aminoácidos N-terminales de la proteína normal y se sustituían por 19 aminoácidos derivados de secuencias nucleotídicas del plásmido (*caja negra*). Ello potenciaba considerablemente su capacidad transformante. La proteína Vav carente de la región aminoterminal y de las secuencias plasmídicas recombinadas presenta igual actividad transformante. De donde se desprende que la activación de este oncogén se debe a la deleción de su región aminoterminal y no a la inclusión de las secuencias del plásmido.

de la transformación, se comprobó que se trataba de un gen hasta entonces desconocido; se le impuso el nombre de *vav* (sexta letra del alefato hebreo y sexto oncogén aislado en dicho laboratorio). También se aisló el ADN complementario (ADNc) del protooncogén normal, tanto en ratones como en humanos, empleando el oncogén como sonda de hibridación en genotecas de ADNc.

Se activa un oncogén cuando un gen normal sufre una mutación que determina una proteína con propiedades tumorigénicas. Hay múltiples tipos de mutaciones responsables: puntuales, deleciones, inserciones, translocaciones, repeticiones en tándem y otras. Las mutaciones pueden producirse en el tejido donde se instala el tumor u ocurrir durante los procesos de transferencia génica.

El análisis de la secuencia del oncogén *vav* indicó que su activación se había producido *in vitro*. Por procesos desconocidos, el protooncogén se había recombinado en su región proximal con una región del plásmido que confiere resistencia a G418 en los procesos de transferencia génica donde se seleccionan las células que han integrado muestras de ADN en su genoma. En el transcurso de la recombinación se eliminaban los 61 aminoácidos N-terminales de la proteína normal, reemplazados por 19 aminoácidos derivados de secuencias nucleotídicas del plásmido. Pero no quedaba claro si el oncogén surgía en virtud de la inserción de las nuevas secuencias o si la activación se debía, por contra, a la deleción de la región aminoterminal.

Una nueva ronda de experimentos, llevada a cabo por Katzav, a la sazón en el Hospital Pediátrico de San Judas en Memphis, y por J. C. Coppola, en el laboratorio de Barbacid, mostró que la activación oncogénica correspondía a la deleción. En dichos experimentos se empleó una versión abreviada del procedimiento de transferencia génica mencionado. En este caso, el ADNc del oncogén, ahora presente en un plásmido que permite expresar proteínas en células animales gracias a la presencia de un potente promotor vírico, pasa a células de ratón cultivadas.

Las células que incorporan el ADN complementario, una vez transformadas, se dividen sin cesar hasta crear un “foco” sobre la monocapa de células normales sin transformar. (Llámase “foco” a la agrupación de células procedentes de una sola célula transformada.) Podemos cuantificar la actividad transformante de los oncogenes: cuando se transfectan cantidades iguales de ADN, el número de focos obtenido es proporcional a la actividad transformante de cada uno de los ADN transferidos.

En el laboratorio de Katzav en Memphis y en el de Barbacid se comprobó que un ADNc del oncogén *vav* carente de la región aminoterminal y de las secuencias plasmídicas recombinadas inducía un número de focos similar (esto es, presentaba igual actividad transformante) que el ADNc del oncogén aislado originalmente. De ello se desprendía que la activación del oncogén debíase a una deleción, la de su región aminoterminal, y no a la inclusión de las secuencias del plásmido.

El ensayo de transfección mide sólo la capacidad de activar procesos proliferativos incontrolados en ciertos tipos celulares; no cabe, pues, esperar del aislamiento del oncogén y de su versión silvestre ningún indicio especial acerca de su función bioquímica y biológica. Los oncólogos moleculares han de mirar a otro lado, conscientes de que entendiendo cómo opera la forma salvaje podrá luego investigarse por qué se pierde el control en la forma oncogénica.

Con otras palabras, los biólogos han de conjugar el estudio de la expresión del protooncogén en diversos órganos, la búsqueda de regiones de homología con otras proteínas de función conocida y el ensayo *in vivo* con ratones transgénicos, que permita evaluar el alcance de estos genes en la embriogénesis y en la fisiología del animal adulto.

El primer indicio claro sobre la función asignada a la proteína Vav emergió del estudio del patrón de expresión del gen *vav*. Lo realizaron Katzav y X. R. Bustelo en el laboratorio de Barbacid. Katzav comprobó que, cuando el ADNc del oncogén *vav*, marcado radiactivamente, se hibridaba con ARNm obtenidos de una amplia colección de tipos celulares, inmovilizados en un filtro de nitrocelulosa, sólo se detectaba la presencia del ARNm de *vav* en líneas celulares hematopoyéticas. La confirmación definitiva de su expresión hematopoyética vino de la mano de la hibridación de ARNm *in situ*. Esta técnica, puesta a punto en el laboratorio de R. C. Angerer, consiste en la hibridación de secciones de tejidos o embriones con un ARN marcado radiactivamente (sintetizado *in vitro*) que es complementario al ARNm cuya expresión quiere investigarse.

Debido a la hibridación específica

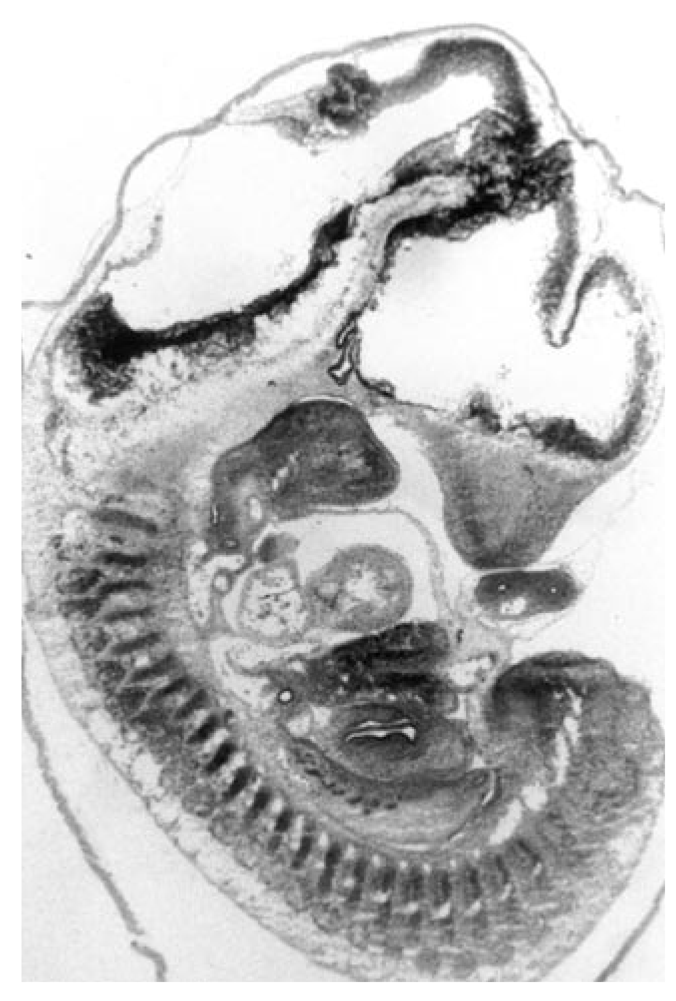
entre ácidos nucleicos de cadena sencilla que poseen secuencias complementarias, las células que expresan el ARNm retienen la sonda radiactiva a través de su hibridación con el ARNm endógeno, lo que posibilita su detección por autorradiografía. Cuando se usó una sonda de ARN complementaria al ARNm de *vav*, se apreció que este mensajero se expresaba sólo en células hematopoyéticas. El ARNm de *vav* se detectó en la médula ósea, en los linfocitos *T* del timo y en el bazo y los ganglios linfáticos.

Mediante técnicas inmunocitoquímicas se demostró que la proteína Vav se expresaba en la mayoría de las células hematopoyéticas, incluidos granulocitos y linfocitos *T* y *B* del bazo, linfocitos *T* inmaduros del timo, así como en todos los linajes hematopoyéticos presentes en la médula ósea (megacarioblastos, granulocitos, linfocitos y monocitos).

¿En qué momento de su desarrollo funcional las células hematopoyéticas exigían la presencia de la proteína Vav? Para responder a la cuestión, se abordó la expresión de su gen durante la embriogénesis del ratón. En este animal la aparición de la hematopoyesis embrionaria está regulada temporal y regionalmente. Las células hematopoyéticas comienzan a aparecer en el día séptimo de gestación en las lagunas sanguíneas del saco vitelino, una de las membranas que recubren externamente al embrión. En estas lagunas se producen algunos macrófagos y, fundamentalmente, la generación inicial de eritrocitos nucleados, los primeros corpúsculos sanguíneos del embrión. A partir del día noveno de gestación, una minoría de células procedentes del saco vitelino pueblan otro órgano en formación del embrión, el hígado.

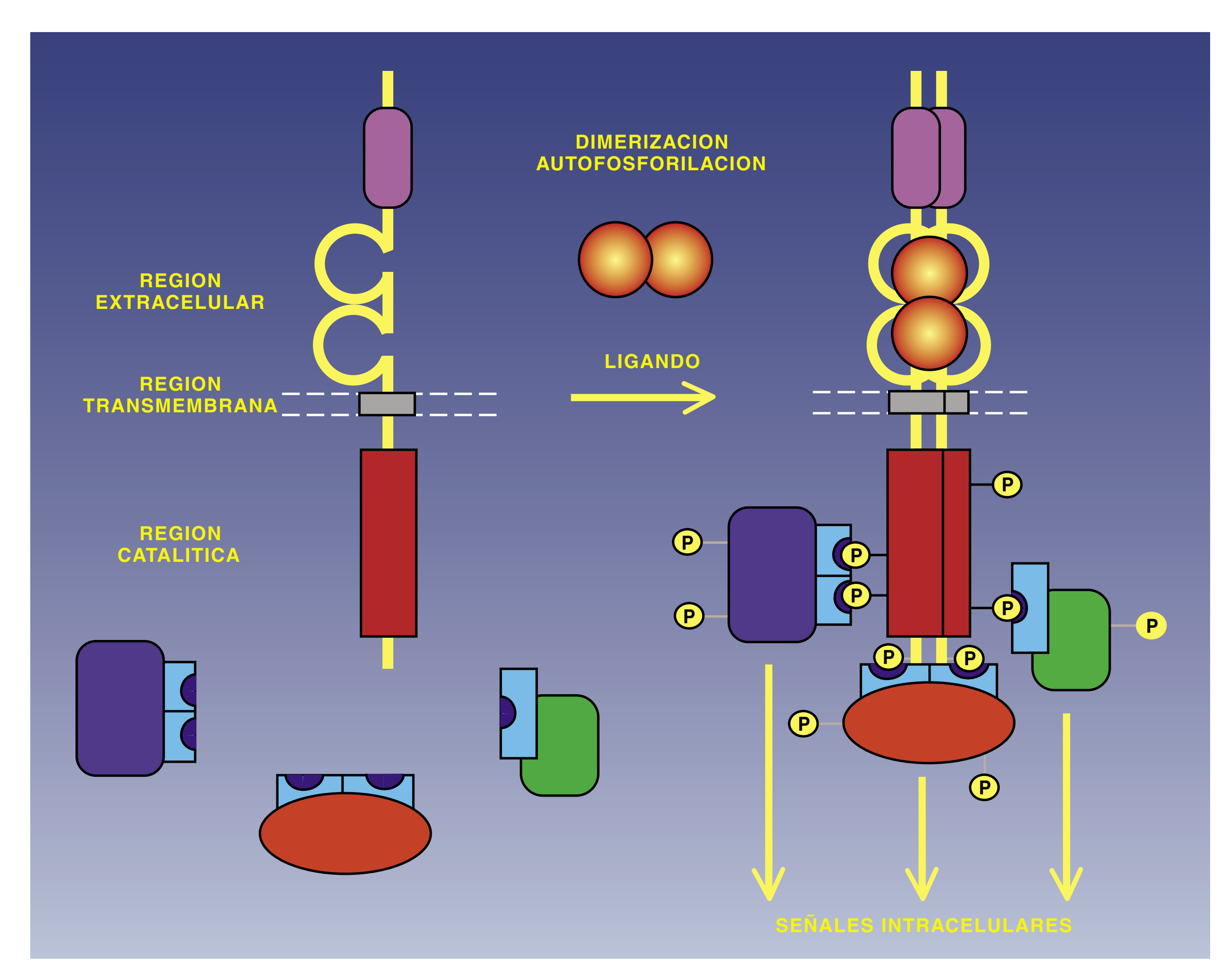
En el hígado se produce la primera explosión de células hematopoyéticas; aparecen una nueva generación de células rojas, células mieloides y megacariocitos (las células precursoras de las plaquetas). Este órgano es el principal lugar de hematopoyesis hasta el día 13-14 de gestación, cuando la función hematopoyética se diversifica regionalmente y coloniza la médula ósea, el timo y el bazo. La hibridación *in situ* reveló que la expresión del protooncogén *vav* iba pareja a esta evolución funcional: salvando la excepción de las lagunas sanguíneas, donde sólo una minoría de células eritroides mostraba expresión de su mensajero, este ARN se dejó ver en el hígado fetal, en el timo embrionario, el bazo y la médula ósea.

La presencia de la proteína Vav en todas las células linfoides desde el período embrionario hasta el estadio adulto le otorgaba un papel esencial en el desarrollo y mantenimiento del sistema hematopoyético. Pero, ¿cuál? La respuesta vino de dos pistas obtenidas de la comparación entre la estructura primaria de Vav y otras proteínas de función conocida. El primer indicio lo aportó el descu-





3. DETECCION DE LA EXPRESION del protooncogén *vav* en un embrión de ratón de once días y medio mediante hibridación *in situ* utilizando una sonda del protooncogén marcada radiactivamente. Se observa en el panel de la derecha que la expresión de *vav* se limita al hígado, único tejido con función hematopoyética en este estadio de embriogénesis.



4. ACTIVACION DE UN RECEPTOR con actividad tirosina quinasa. Cuando el ligando se une al receptor induce la dimerización y autofosforilación de éste en residuos de tirosina presentes en su dominio citoplasmático, además de fosforilar substratos también citoplasmáticos. De ese proceso se sirve el ligando para activar los receptores. Se reclutarán también otros substratos caracterizados por la posesión de un dominio SH2 gracias a su afinidad por las tirosinas fosforiladas presentes en el receptor activado. De ese modo surgen múltiples rutas de señalización hacia el interior de la célula.

brimiento de un dominio estructural SH2 en la molécula de Vav.

Los dominios estructurales SH2 se descubrieron en el laboratorio de Tony Pawson, del hospital Monte Sinaí de Toronto, mientras se buscaban zonas de semejanza entre oncogenes de la familia Src, un grupo de enzimas con actividad tirosina quinasa (enzimas que promueven la fosforilación de proteínas en el aminoácido tirosina). Con el tiempo, se comprobó que tales dominios se daban en moléculas muy dispares, si bien todas ellas compartían la capacidad de reconocer y unirse a regiones de proteínas dotadas de tirosinas fosforiladas. En virtud de esa propiedad, las proteínas que contienen regiones SH2 pueden unirse a otras proteínas fosforiladas; de este tipo son los receptores mitogénicos con actividad tirosina quinasa que se autofosforilan tras su unión a sus ligandos.

El hallazgo de secuencias SH2 en la proteína codificada por el protooncogén *vav* indujo a investigar si la proteína Vav intervenía en procesos de transmisión de señales celulares. El estudio conjunto de Bustelo, en el laboratorio de Barbacid, y miembros del laboratorio de J. Schlessinger, en la Universidad de Nueva York, demostró que tal era lo que acontecía.

En la demostración de la tarea seña- lizadora que cumplía a la proteína Vav se recurrió a la estimulación de fibroblastos murinos mediante dos factores mitogénicos: el factor de crecimiento epidérmico (EGF, del inglés "epidermal growth factor") y el derivado de plaquetas (PDGF, del inglés "platelet-derived growth factor"). Estos dos ligandos transmiten su señal mitogénica a través de receptores específicos anclados en la membrana plasmática. Los receptores poseen una región extracelular (que reconoce al ligando), una región transmembrana (que permite el anclaje de estas proteínas en la membrana plasmática) y una región intracelular con actividad tirosina quinasa.

El estímulo mitogénico traído por el ligando a su receptor se transmite hacia el interior celular en tres pasos. En primer lugar, la unión del ligando al receptor induce la dimerización del receptor, la activación de su actividad tirosina quinasa y la autofosforilación del receptor dimerizado en tirosinas. Tras ello, los residuos fosforilados del receptor atraen a las proteínas de señalización que poseen dominios

SH2; se produce entonces la interacción entre receptor y substratos. Por consiguiente, se activan las rutas reguladas por estas proteínas de señalización mediante dos mecanismos. En algunos casos la fosforilación induce un cambio conformacional en las proteínas dando lugar a un aumento en su actividad enzimática. En otros casos, la activación de la ruta se debe a que la interacción del receptor con esas proteínas induce el acercamiento de éstas a sus sustratos localizados en la membrana plasmática.

Cuando se usaron células de ratón que habían recibido, mediante un plásmido, el ADNc del protooncogén *vav*, se observó que la oncoproteína presentaba un grupo fosfórico en los aminoácidos tirosina. La fosforilación ponía de manifiesto que se había producido una relación funcional entre proteína Vav y receptores de membrana. Ello sugería, además, que la fosforilación podía inducirse en células en reposo si se estimulaban con EGF o con PDGF.

Estos experimentos mostraron que Vav podía asociarse con los receptores, siempre que los activase de antemano su mitógeno respectivo; es decir, cuando se hallaran autofosforilados. Al incubar lisados celulares con la región SH2 de la proteína Vav expresada en bacterias, se comprobó que ésta se unía al receptor activado del EGF sin necesidad de ninguna otra región de Vav. La región se bastaba por sí sola para conferir la capacidad de asociación a los receptores. Quedaba, pues, patente que el dominio SH2 de Vav era funcional y que esta proteína intervenía en procesos de transmisión de estímulos mitogénicos, es decir, promotores de la división celular.

La expresión hematopoyética de Vav nos llevó también a investigar la implicación de esta proteína en los procesos de transmisión de señales. Recurrimos a los linfocitos *T* y *B*, células encargadas de patrullar por el organismo a la búsqueda de antígenos víricos, bacterianos y tumorales; reconocidos como cuerpos extraños, los linfocitos los neutralizan mediante la secreción de anticuerpos o destruyen con citotoxinas.

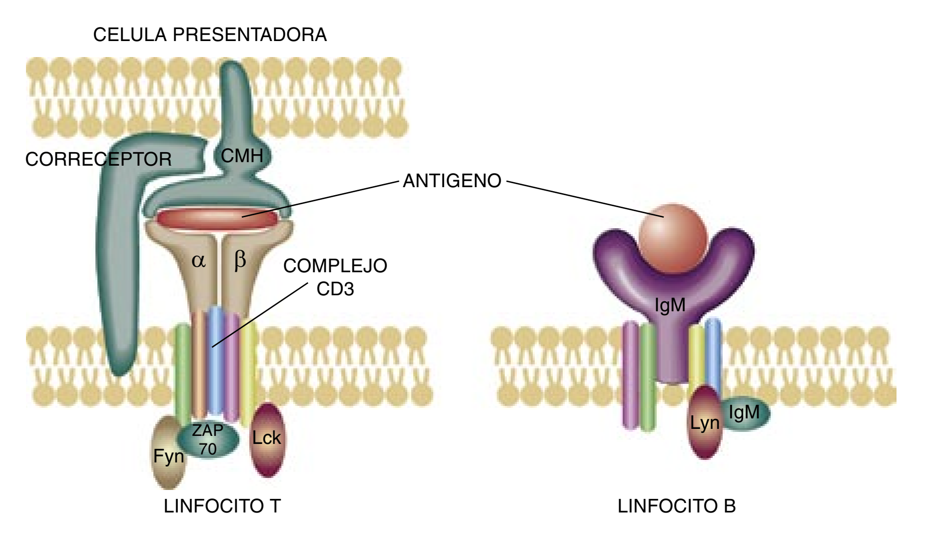
La función de los linfocitos está mediada por la presencia en su membrana plasmática de receptores de las células *T* (RCT) y *B* (RCB). Compete a estos receptores reconocer específicamente el antígeno y, tras la unión de éste, transmitir la señal al citoplasma. Se desencadena así una cascada de activación celular que desemboca en la proliferación del linfocito y en la secreción de anticuerpos, linfoquinas y proteínas citotóxicas.

La estructura de los receptores RCT y RCB reviste mayor complejidad que la de los receptores mitogénicos tradicionales. Consta de múltiples subunidades proteicas con funciones distintas. Unas subunidades tienen que ver con el reconocimiento del antígeno; otras participan en la transmisión de la señal extracelular hacia el interior celular. A diferencia de los receptores mitogénicos, estas subunidades carecen de actividad tirosina quinasa. De la fosforilación se encargan quinasas citoplasmáticas que se encuentran asociadas a la porción citoplasmática de ciertas subunidades del receptor y que se activan con la unión del antígeno.

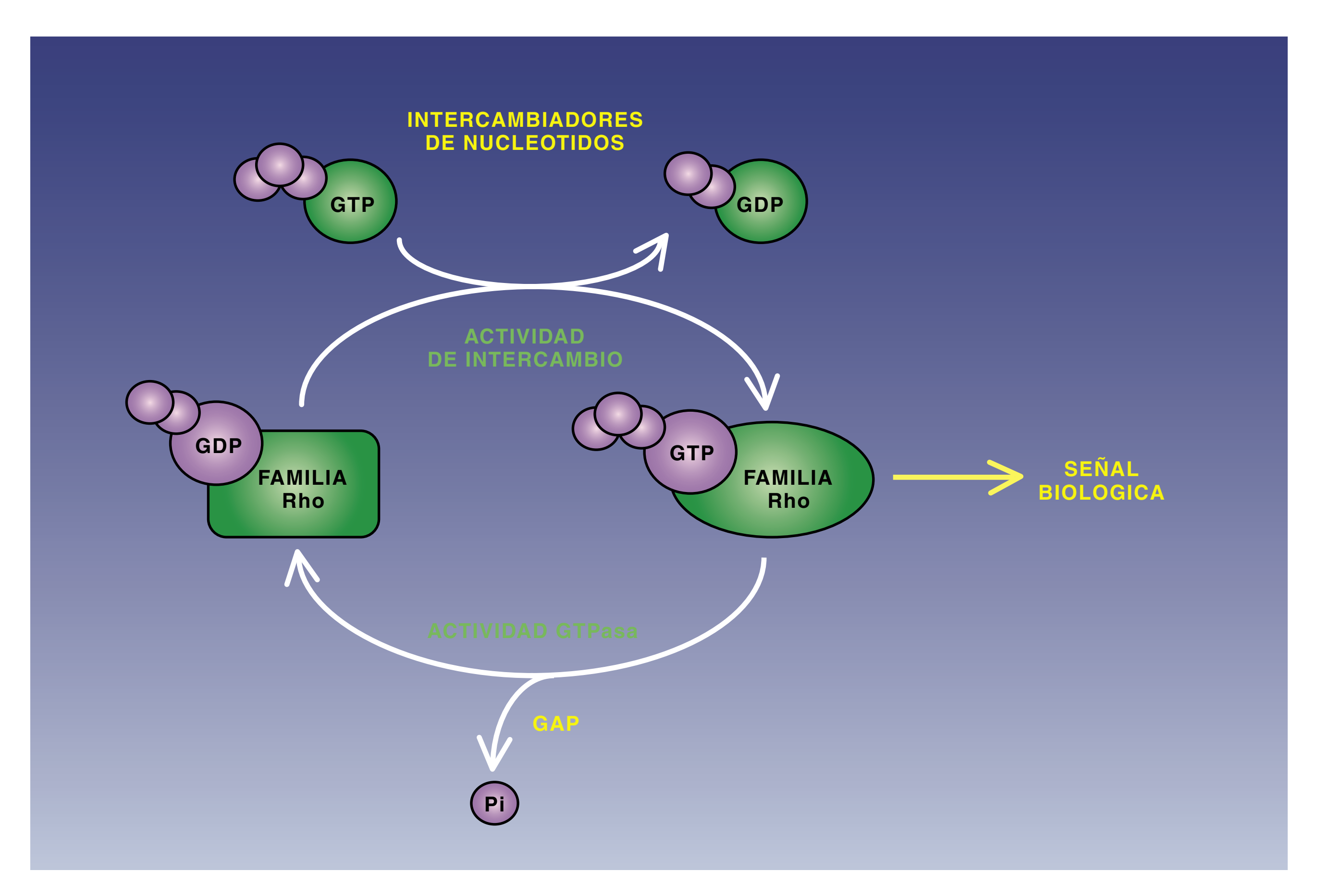
Cuando se estimularon los receptores de células *T* y *B* mediante la adición de anticuerpos específicos contra el RCT y el RCB, respectivamente, se comprobó que este proceso conllevaba la fosforilación de Vav en residuos tirosina. En ambos casos la estimulación, muy rápida, era transitoria. La determinación de los aminoácidos fosforilados mediante análisis del hidrolizado de la proteína Vav en cromatografía de capa fina mostró que la fosforilación afectaba casi exclusivamente al aminoácido tirosina, pero no a la serina ni a la treonina, potenciales substratos de quinasas intracelulares. Semejante discriminación revelaba que una proteína con actividad tirosina quinasa era la responsable única de la fosforilación de Vav. Como los linfocitos *T* y *B* son células que expresan dicha proteína, resultaba patente la implicación *in vivo* de Vav en los procesos de transmisión de señales intracelulares.

La investigación posterior mostró que la activación de Vav no era exclusiva de los linfocitos *T* y *B*. La inducían otros receptores y en los restantes linajes celulares del sistema hematopoyético. Abundando en ello, se comprobó la fosforilación de Vav tras la activación de los receptores de la inmunoglobulina E de los mastocitos (las células responsables de las respuestas alérgicas), la interleucina-2 en células *T*, los ligandos de las tirosina quinasas hematopoyéticas c-Kit y Flk-2 y muchos otros.

El descubrimiento de que Vav servía de substrato para proteínas con actividad tirosina quinasa fue un paso importante en el camino hacia la elucidación de su función. Permitió, en efecto, circunscribir su actividad biológica a los primeros estadios de la transmisión de señales de receptores antigénicos y mitogénicos. Mas, por entonces, se desconocía la actividad bioquímica de Vav en dichos procesos. Pasarían varios años hasta que se identificara la ruta de señalización activada por Vav y se comprendieran los efectos biológicos que su fosforilación ejercía. Para que ello ocurriera tuvo que descubrirse una segunda pista estructural, la presencia de un dominio DH en la molécula de Vav.



5. RECEPTORES DE LOS LINFOCITOS *T* Y *B*. Se activan estos receptores al unirse a un determinado antígeno. Se les agregan proteínas tirosina quinasas de la familia src: Fyn, Lck, Lyn o Syk. La activación de éstas pone en marcha una cadena de señalización que envía la señal de la membrana hacia el núcleo celular.



6. CICLO DE ACTIVIDAD DE LAS PROTEINAS de la familia Rho. Al estar unidas las proteínas al guanosín difosfato (GDP), un nucleótido, permanecen en estado inactivo. La presencia de un factor de intercambio cataliza la liberación de GDP y su intercambio por GTP. Con ello se altera la estructura terciaria de la proteína, modificación que posibilita la interacción entre la proteína y sus distintos efectores, con la generación consiguiente de una respuesta biológica. El sistema vuelve a su estado de reposo debido a que las proteínas de esta familia poseen actividad GTPasa intrínseca, en virtud de la cual el GTP se hidroliza paulatinamente a GDP y se bloquea la proteína.

Los dominios DH (del inglés, Dbl-homology) se observaron en el laboratorio de Stuart Aaronson, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud en Bethesda. El rastreo por ordenador identificó una región de homología entre los productos de dos oncogenes que en aquel entonces (1991) carecían de función conocida (Dbl y Bcr) y la proteína de levadura Cdc24.

Más tarde, Richard Cerione, de Cornell, mostró que estos dominios operaban como intercambiadores de nucleótidos sobre miembros de la familia Rho, un grupo de proteínas con actividad GTPasa que unen e hidrolizan el nucleótido trifosfato de guanosina (GTP) para convertirlo en su forma difosfato (GDP).

Las proteínas Rho, igual que la mayoría de las proteínas que engarzan nucleótidos de guanosina, se comportan como interruptores celulares. Cuando las células se hallan en reposo, las proteínas Rho permanecen inactivas, unidas a GDP. En este estado conformacional de las proteínas, no puede haber interacción con sus moléculas efectoras. Por contra, cuando los mitógenos estimulan las células, las proteínas Rho saltan a un estado activo mediante la liberación de la molécula de GDP y su sustitución por una molécula de GTP.

Una vez unidas al trifosfato de guanosina, las proteínas Rho cambian su conformación terciaria. Pueden ahora trabarse a sus moléculas efectoras, permitiendo la activación final de su cascada de señalización. Para pasar del estado unido a GDP al unido a GTP se requiere la presencia de un catalizador especial. Este no es otro que las proteínas portadoras de la región DH. Sin la participación de estas enzimas, las proteínas Rho tardarían horas en cambiar de la forma inactiva a la activa, lo que impediría un acoplamiento rápido entre los estímulos extracelulares y la respuesta bioquímica del interior celular.

La presencia del dominio DH en la estructura de Vav y la implicación de estos dominios en la regulación de distintos miembros de la familia Rho llevó a nuestros grupos de Stony Brook (Bustelo) y Bethesda (Crespo y Gutkind) a estudiar la vinculación de las formas fosforilada y desfosforilada de Vav con esta familia de GTPasas.

De entrada, había que sintetizar y purificar Vav, con sus posibles substratos de la familia Rho. Mediante ingeniería genética logramos que la proteína se expresara en células de insecto (células Sf9). Nos servimos de un virus que habíamos modificado de antemano para que sintetizara abundante Vav durante la formación de partículas víricas en las células infectadas. Tras purificar la proteína procedente de estas células, obtuvimos la forma fosforilada de Vav al incubar la oncoproteína con una tirosina quinasa (Lck), también purificada de célula de insectos. Para facilitar la fosforilación de Vav, en la

incubación se incluyó moléculas de trifosfato de adenosina, el donador de fosfatos empleado por todas las quinasas celulares.

La familia Rho tiene más de ocho miembros conocidos. Escogimos tres para los ensayos de intercambio de nucleótidos: las proteínas Rac-1, RhoA, y Cdc42. Estas proteínas se expresaron y purificaron utilizando plásmidos que promueven la producción de altas cantidades de proteína en bacterias.

Mediante ensayos de intercambio *in vitro*, comprobamos que la forma sin fosforilar de Vav se mantenía inactiva cuando se incubaba con cualquiera de las tres proteínas seleccionadas de la familia Rho. Sin embargo, cuando los ensayos incluyeron la forma de Vav fosforilada en tirosina, quedó patente que ésta podía ahora inducir un intercambio de nucleótidos de guanosina en un miembro de la familia Rho, la proteína Rac-1. Al menos *in vitro*, Vav se comportaba como un intercambiador de nucleótidos específico para Rac-1, cuya actividad se regulaba por fosforilación en tirosinas.

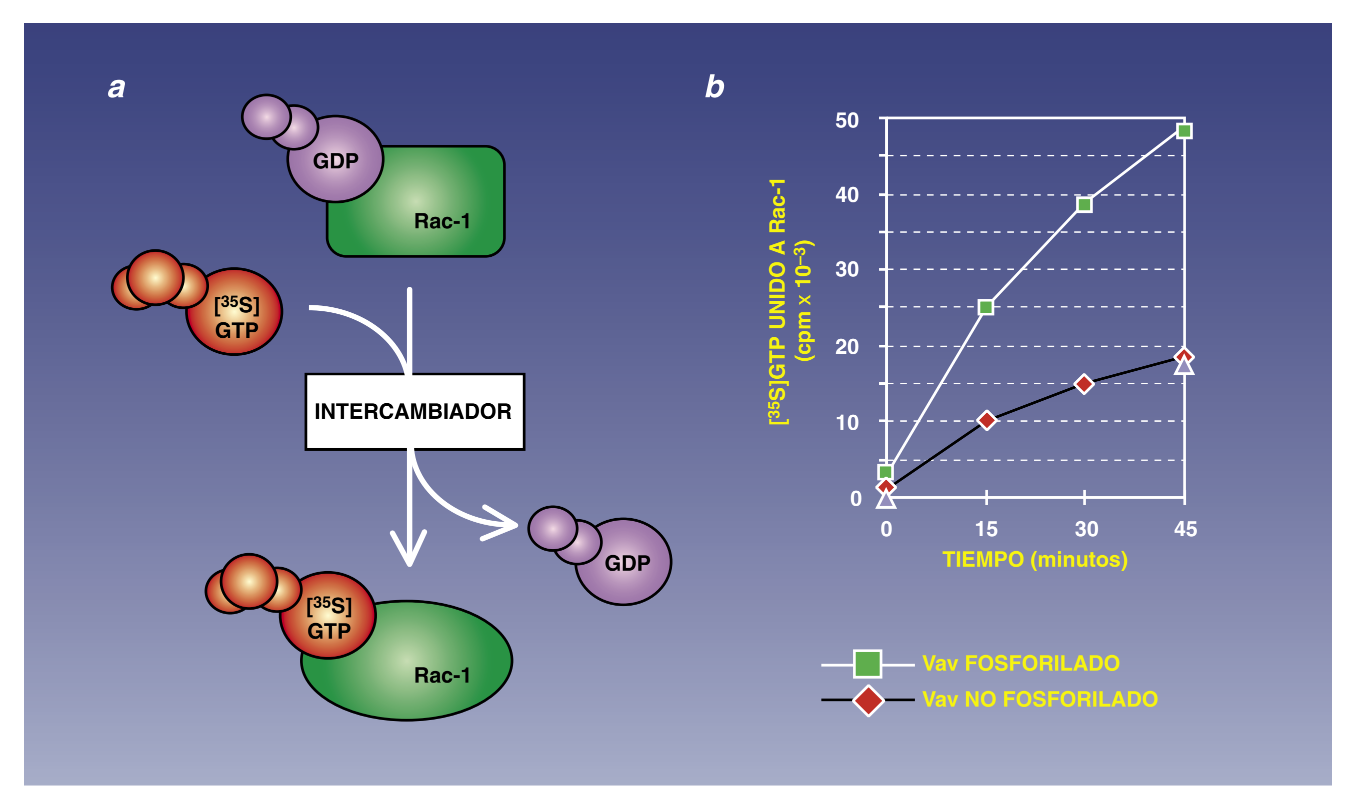
Con el fin de obtener una prueba más sólida del papel estimulador de la proteína Rac-1 que ejercía Vav, decidimos correlacionar *in vivo* la actividad biológica de Vav con la activación de Rac-1. Para ello, recurrimos a una nueva técnica puesta a punto por uno de nosotros (Crespo) que permitía medir *in vivo* el nivel de activación de Rac-1 a través de su capacidad de unirse a nucleótidos de guanosina radiactivos. En dicho ensayo, las células COS-7 reciben en su genoma combinaciones adecuadas de plásmidos de expresión; permanecen así en reposo en un medio de cultivo carente de fosfatos, lo que lleva a la degradación y bloqueo de la síntesis de moléculas de GTP.

Las células se cultivan luego, durante períodos muy cortos, con fosfato inorgánico radiactivo, se tratan con detergentes para disolver la membrana plasmática y lisarlas. Los extractos celulares se inmunoprecipitan con anticuerpos específicos contra Rac-1. Por fin, los nucleótidos radiactivos pegados a Rac-1 se evalúan mediante una cromatografía de capa fina optimizada para separar moléculas de nucleótidos.

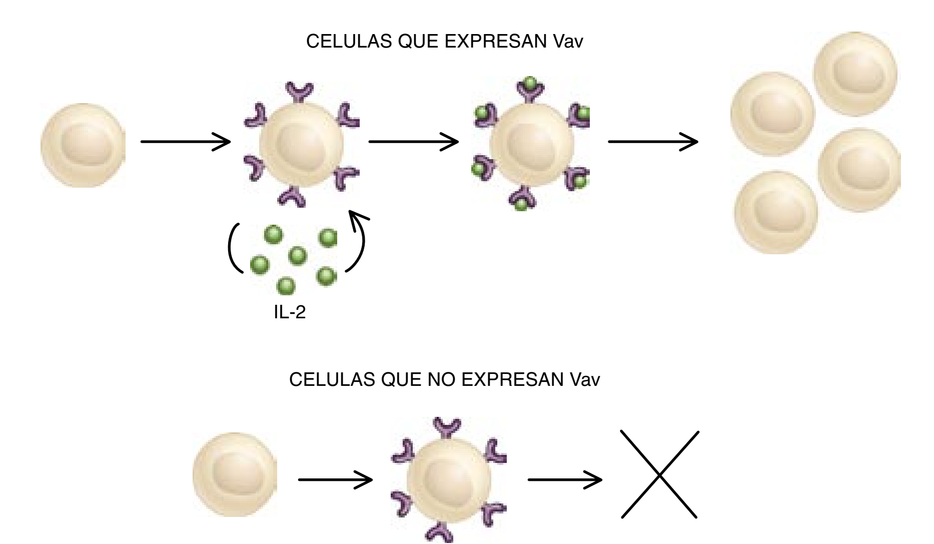
De acuerdo con este modelo experimental, si existe una actividad que promueve el intercambio de nucleótidos en Rac-1, se reflejará en la incorporación de nucleótidos de guanosina radiactivos en la proteína. Los experimentos confirmaron nuestros resultados iniciales *in vitro*: Vav no intervenía en el intercambio de nucleótidos hacia Rac-1 en su estado sin fosforilar, pero sí intervenía cuando se inducía su fosforilación.

Otras investigaciones demostraron que la proteína Vav alteraba *in vivo* la proteína Rac-1, pero no modificaba otros miembros de la familia Rho, como RhoA, Cdc42 y otras GTPasas más distantes desde una óptica evolutiva (proteína Ras). De nuestros experimentos resultaba, pues, que Vav activaba la proteína Rac-1. Además, era regulable por fosforilación en tirosinas, lo mismo *in vitro* que *in vivo*.

Quedaba clara la implicación de Vav en los procesos de señalización celulares. La estimulación mitogénica o antigénica de las células conlleva la incorporación de un grupo fosfórico en las tirosinas de la oncoproteína Vav, la estimulación consiguiente



7. ENSAYO DE INTERCAMBIO *in vitro*. En presencia de un intercambiador adecuado, Rac-1 intercambia su GDP por GTP marcado con ^{35}S, un isótopo radiactivo (*a*). Mediante esa prueba se determinó la actividad intercambiadora de Vav sobre Rac-1. La proteína Rac-1, purificada en bacterias y unida a GDP, permanece inalterada si la incubamos con proteína Vav, purificada en células de insecto en presencia de GTP marcado radiactivamente (*b*). Sin embargo, cuando se fosforila Vav con la enzima tirosina quinasa Lck se induce el intercambio en Rac-1 de GDP por GTP, lo cual se detecta por un incremento en la señal radiactiva asociada a Rac-1.



8. LA AUSENCIA DE VAV parece afectar la proliferación de linfocitos *T*. En efecto, éstos no pueden proliferar normalmente si se les somete a estímulos extracelulares que inician sus receptores antigénicos. Cuando células carentes de Vav procedentes de ratones transgénicos Vav (–/–) se cultivaron *in vitro*, se pudo comprobar que este defecto proliferativo se debía a la ausencia de secreción de la interleucina 2, una molécula imprescindible para los últimos estadios de la proliferación de los linfocitos *T*. Todo indica que la ausencia de Vav afecta a una ruta muy específica, la que va desde el receptor antigénico de las células *T* hasta la síntesis y secreción de la interleucina 2.

de su actividad enzimática como intercambiador de nucleótidos en la GTPasa Rac-1 y, en consecuencia, la activación de esta última proteína.

Las investigaciones sobre las proteínas Rho —acometidas por los grupos de Juan Carlos Lacal, Marc Symons, Allan Hall y Gutkind— han conducido al descubrimiento de sus efectores y al conocimiento de su implicación en diversos procesos biológicos. Los trabajos de Lacal mostraron que un miembro de la familia Rho tenía capacidad transformante cuando se introducían mutaciones puntuales que bloqueaban a la proteína en su estado activado. Así se vio que tales proteínas desempeñaban un papel esencial en la regulación de la proliferación en células normales.

Symons generalizó luego las observaciones de Lacal, al mostrar que la expresión de la forma activada de Rac-1 poseía también potencial transformante.

El trabajo del grupo de Hall introdujo una faceta nueva en la función de estas proteínas: con técnicas de microinyección de proteínas en células en cultivo, demostraron que las proteínas Rac-1, RhoA y Cdc42 intervenían en la regulación del citoesqueleto. En el caso de Rac-1, la microinyección de la proteína activada daba lugar a la generación de frecuentes plegamientos de la membrana plasmática y a la aparición de vesículas de gran tamaño en el citoplasma. En el caso de RhoA, su forma activada instaba la aparición de filamentos de actina (fibras de tensión) a lo largo del citosol y la formación de placas de adhesión celulares. Finalmente, la introducción de la forma activada de Cdc42 conllevaba la formación de espículas o filipodios de la membrana plasmática.

Gutkind completó el panorama de las rutas de señalización de estas proteínas, al demostrar que su activación promovía la estimulación de la proteína JNK, una quinasa que fosforila serinas y treoninas. La quinasa en cuestión tenía por substrato un factor de transcripción con capacidad transformante. Estableció, pues, una conexión final entre la estimulación que se insta desde la membrana con la activación de procesos transcripcionales desarrollados en el núcleo celular. Lacal demostró, por fin, que Rac-1, RhoA y Cdc42 activaban también otros factores de transcripción. Tomados en su conjunto, esta gavilla de experimentos pusieron de manifiesto la importancia de las proteínas aludidas en procesos citoesqueléticos, transcripcionales y proliferativos.

Gracias a tales investigaciones, no sólo conocemos los elementos de la ruta de señalización de Vav que van desde los receptores hasta Rac-1, sino también algunas de las moléculas efectoras que subyacen bajo Rac-1 y que transmiten el estímulo mitogénico hasta el núcleo celular. Nosotros hemos observado que la proteína Vav activa funciones atribuidas antes a Rac-1. Por ejemplo, Vav activa la ruta de las quinasas JNK, activación que depende de la fosforilación de Vav en residuos de tirosina. Hemos comprobado también que la expresión del oncogén *vav* induce un fenotipo morfológico muy similar al observado por la expresión de los mutantes activados de Rac-1. Se ha demostrado, por último, que la sobreexpresión de mutantes inactivos de Rac-1 anula la capacidad transformante de Vav y su capacidad de activar la ruta conducente a las quinasas JNK. En resumen, la ruta de señalización conocida para Rac-1 forma parte integrante del engranaje utilizado por Vav para inducir la proliferación y la transformación morfológica en diversos tipos celulares.

Los estudios reseñados nos han permitido conocer los procesos bioquímicos y rutas de señalización de Vav. Otros grupos se empeñaron en descifrar el interés de esa ruta para la vida del ratón.

Los equipos dirigidos por K. Fisher, V.L.J. Tybulewicz y S.H. Orkin prepararon ratones transgénicos; por técnicas de recombinación homóloga inactivaron en éstos el gen *vav*. Se engendraron, pues, razas de ratones que no expresaban la proteína Vav en ningún órgano. En el análisis de los ratones surgieron tres aspectos importantes de la función de Vav.

Se demostró, primero, que los ratones carentes de Vav podían llevar a cabo un desarrollo embrionario normal y alcanzar el estado adulto. La proteína no interviene, pues, en procesos que afectan a la viabilidad de los embriones o al funcionamiento de órganos vitales del ratón adulto. En segundo lugar, el análisis de las células del sistema hematopoyético reveló que la mayoría de los linajes celulares del sistema mieloide (macrófagos, plaquetas, granulocitos, etc.) y eritroide (glóbulos rojos) podían desarrollarse normalmente en ausencia de Vav. Tampoco aquí resulta la proteína imprescindible, pese a que pueda detectarse la fosforilación de Vav en tirosinas en estos tipos celulares.

Pero la ausencia de Vav sí comportaba graves limitaciones en las células linfoides del linaje *T* y *B*. En el caso de las células *T*, los ratones carentes

de la expresión de Vav poseían poblaciones de linfocitos *T* más menguadas que las poblaciones silvestres. La ausencia de Vav no bloquearía, pues, el desarrollo de los linfocitos *T*, sino que condiciona la proliferación de células precursoras dando lugar a una expansión muy reducida del número de células maduras. Además, los pocos linfocitos *T* maduros presentaban anormalidades funcionales, ya que no podían proliferar tras su exposición a estímulos extracelulares que iniciaban sus receptores antigénicos. Cuando estas células carentes de Vav se cultivaron *in vitro*, se vio que este defecto proliferativo se debía a la ausencia de secreción de la interleucina 2, una molécula esencial para la proliferación de los linfocitos *T*. Curiosamente, los grupos de Tybulewicz y Orkin comprobaron que la proliferación de estas células *T* volvía a niveles normales si añadían interleucina 2 exógena al medio de cultivo. De donde se desprende que la ausencia de Vav afecta a una ruta muy específica, la que va desde el receptor antigénico de las células *T* hasta la síntesis y secreción de la interleucina 2.

El caso de las células *B* está peor caracterizado. Se sabe que ha decaído el número de células *B* maduras, aunque dicha reducción varía bastante según los autores. Lo indiscutible es que la ausencia de Vav provoca la desaparición absoluta de linfocitos *B* que pueblan la cavidad peritoneal. Las células *B* maduras que se originan en los animales carentes de Vav no pueden montar una respuesta proliferativa plena tras la activación de sus receptores antigénicos. Sin embargo, todavía no se conoce cuál es el problema bioquímico responsable de esta incapacidad proliferativa. Los estudios sobre Vav en estos animales transgénicos ilustran la importancia que las formas no mutadas de los oncogenes tienen en los procesos proliferativos y de diferenciación de las células normales. Debido a su íntima relación funcional con procesos proliferativos, estos genes no son sólo culpables de originar procesos cancerígenos cuando pierden el control, sino que resultan también decisivos para la vida de las células en que se expresan.

Se ha avanzado mucho en el conocimiento de la función del protooncogén *vav* desde su aislamiento en 1989. Conocemos ya las estructuras de los protooncogenes humano y murino, así como su expresión específica en células hematopoyéticas y su implicación en los procesos de transmisión de señales de algunos de sus receptores. Se ha descubierto que su función en tales procesos se establece a través de su fosforilación en tirosinas y la activación consiguiente de la ruta de Rac-1. Y se han identificado en parte los elementos de señalización localizados por debajo de esta GTPasa.

El mejor conocimiento de la proteína Vav ha arrojado luz sobre los procesos biológicos que determinan la activación de proteínas G por receptores de membrana, así como sobre los mecanismos moleculares responsables del desarrollo y diferenciación de los linfocitos.

Pero quedan bastantes incógnitas por despejar en torno a la función de Vav, merecedoras de ulterior investigación. No sabemos, por ejemplo, cuáles son las tirosinas de Vav esenciales para su activación por fosforilación. Está todavía por esclarecer la base bioquímica por la cual la eliminación de la región amino-terminal de Vav induce su activación constitutiva e insta procesos tumorigénicos. Lo mismo que los dominios SH2 y DH, la proteína Vav contiene otras regiones cuya función nos sigue vedada.

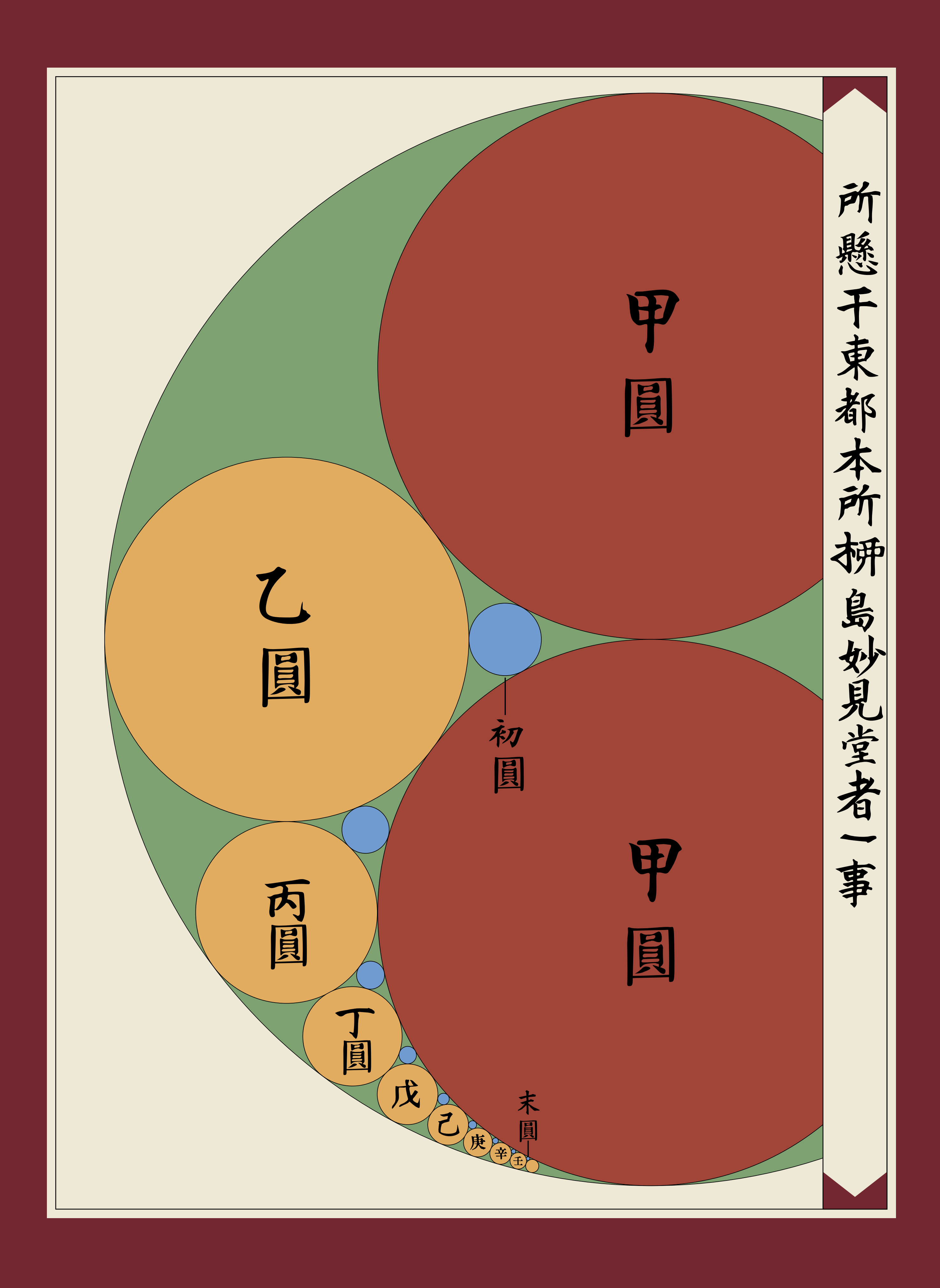
Revestiría, por fin, el máximo interés aplicar lo aprendido de Vav a la oncología humana. Cierto es que el oncogén *vav* no se ha descubierto activo en ningún cáncer humano. Pero, revelada ahora su implicación en la transmisión de señales de las células hematopoyéticas, podrían desarrollarse inhibidores específicos de Vav que reviertan —o frenen, al menos— el proceso de proliferación incontrolada de células hematopoyéticas observado, por ejemplo en leucemias.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE VAV FAMILY OF SIGNAL TRANSDUCTION MOLECULES. Xosé R. Bustelo, en *Critycal Reviews in Oncogenesis*, vol. 7, págs. 65-88; 1996.

PHOSPHOTYROSINE-DEPENDENT ACTIVATION OF RAC-1 GDP/GTP EXCHANGE BY THE *VAV* PROTO-ONCOGENE PRODUCT. P. Crespo, K. E. Schuebel, A. A. Ostrom, J. S. Gutkind y Xosé R. Bustelo, en *Nature*, vol. 385, páginas 169- 172; 1997.

ONCOPROTEIN NETWORKS. T. Hunter, en *Cell*, vol. 88 págs. 333-346; 1997.


所懸于東都本所㭙島妙見堂者一事
甲圓
乙圓
初圓
甲圓
丙圓
丁圓
戊
己
庚
辛
壬
末圓

Geometría en los templos del Japón

Durante el período de aislamiento nacional (1639-1854), se produjo en Japón un florecimiento de la matemática autóctona. Así se evidencia en los sangaku, *tablillas de madera grabadas con problemas geométricos*

Tony Rothman, con la cooperación de Hidetoshi Fukagawa

Entre el sinfín de tradiciones y costumbres de todo el mundo, ninguna quizá tan hermosa y elegante como el *sangaku*, geometría votiva de los templos japoneses. Japón permaneció desde 1639 hasta 1854 en un autoaislamiento estricto. Se suprimió el acceso a toda expresión de cultura occidental; se cercenó la penetración de la ciencia europea. Pero durante este período floreció una matemática autóctona peculiar.

Devotos de las matemáticas —samuráis, mercaderes y campesinos— resolvieron problemas geométricos, inscribieron sus empeños en tablillas de madera delicadamente coloreadas y colgaron sus obras bajo los techos de los templos. Estos *sangaku*, literalmente tablilla matemática, pudieron haber sido actos de homenaje —signos de gratitud a un espíritu mentor— o pudieron haber sido descarados desafíos a otros devotos: ¡Resuélvelo, si puedes!

Los *sangaku*, en su mayoría, se ocupan de problemas de geometría euclídea ordinaria. Pero sus problemas difieren de los que solemos encontrar en nuestros manuales. Las circunferencias y las elipses desempeñan un papel mucho más destacado que en los problemas occidentales: círculos inscritos en elipses, elipses en círculos. Algunos de estos ejercicios son sencillos, resolubles por estudiantes de bachillerato. Otros, en cambio, son casi inexpugnables, y los geómetras modernos los abordan recurriendo a matemáticas superiores, como el cálculo diferencial y las transformaciones afines. Cierto es que la mayoría de los problemas entrarían ahora en el dominio de la matemática recreativa o didáctica, pero algunos se anticipan a famosos resultados occidentales, como el teorema de Malfatti, el teorema de Casey o el teorema del sexteto, de Soddy. Uno de los problemas reproduce el teorema del círculo de Descartes. Muchas tabletas, bellísimas, merecen la consideración de obras de arte.

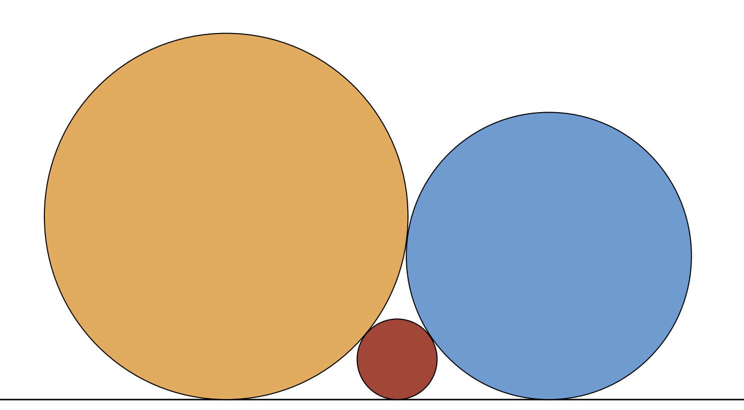
¿Quién creó los *sangaku*? ¿En qué momento? Son preguntas nada fáciles de responder. La costumbre de colgar tabletas en los santuarios se instauró en Japón siglos antes de que hubiera *sangaku*. El sintoísmo, la religión autóctona, está poblado por "ochocientas miríadas de dioses", los *kami*. Dado que a los *kami*, se decía, les encantan los caballos, los fieles que no podían permitirse ofrendar un caballo vivo podían, en cambio, ofrecer un remedo en madera. Por este motivo, muchas tabletas que datan de los siglos XV o anteriores contienen representaciones de caballos.

Entre los *sangaku*, la tableta más antigua de las que han llegado hasta nosotros apareció en la Prefectura de Tochigi. Se remonta a 1683. Otra tableta, procedente de Kioto, data de 1686; una tercera es de 1691. El diario de viaje del matemático Kazu Yamaguchi alude a una tableta más antigua todavía —perdida en la actualidad— fechada en 1668. Los historiadores conjeturan, pues, que la costumbre debió de surgir en la segunda mitad del siglo XVII. En 1789 se publicó la primera colección de problemas *sangaku*. A ésta siguieron otras colecciones de los siglos XVIII y XIX. Estos libros, hermosísimos, estaban escritos a mano o impresos en bloques de madera tallada. Sobreviven más de 880 tablillas, con referencias a cientos de otras en las diversas colecciones. Por los datos de los *sangaku* conservados, las tabletas parecen haber estado distribuidas de modo bastante uniforme por todo Japón, lo mismo en los distritos urbanos que en los rurales. En los santuarios sintoístas se ha hallado el doble de tablillas que en los templos budistas.

La mayoría de los *sangaku* llegados hasta nosotros contienen más de un teorema, y están, con frecuencia, brillantemente iluminados. No suelen exponer la demostración: sólo el resultado. La información restante ofrece, por lo general, el nombre del oferente y la fecha. No todos los problemas se ocupan sólo de geometría. Algunos solicitan el volumen de diversos sólidos, y requieren, por ello, de cálculo integral. (Este punto suscita la interesante cuestión de la clase de técnicas de que pudieron servirse los ejecutantes.) Otras tabletas contienen ecuaciones diofánticas, es decir, ecuaciones algebraicas que han de resolverse con números enteros.

En tiempos modernos, los *sangaku* han caído en el olvido, salvo para unos pocos devotos de la matemática tradicional. Entre ellos está Hidetoshi Fukagawa, un profesor de bachille-

LOS PROBLEMAS *SANGAKU* tratan de una muchedumbre de círculos inscritos en círculos, de esferas contenidas en otras figuras. Este problema está tomado de un *sangaku* datado en 1788 en la Prefectura de Tokio. El problema pide la expresión del radio del n-ésimo círculo máximo en función de r, que es el radio del círculo verde. Observemos que los círculos rojos son idénticos y tienen cada uno radio $r/2$. (El radio del quinto círculo azul es $r/95$.) La solución original de este problema hace uso del teorema japonés homólogo del teorema de Descartes. (*Puede verse al final del artículo.*)



Problemas *sangaku* típicos

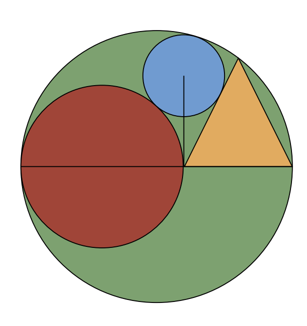
He aquí un sencillo problema que ha sobrevivido en una tableta de 1824, en la Prefectura de Gumma. Los círculos azul y naranja son tangentes exteriores y lo son, también, a una misma recta. El círculo rojo pequeño, tangente a los dos círculos mayores, lo es también a dicha recta. ¿Qué relación existe entre los radios de los tres círculos?

Este llamativo problema fue grabado en 1912 en una tableta que se conserva en la Prefectura de Miyagi; se ignora la fecha del problema. Por un punto P de una elipse se traza la recta normal PQ. Hállese la longitud mínima del segmento PQ. A primera vista, el problema parece trivial: el mínimo de PQ es el eje menor de la elipse. Esta es, efectivamente, la solución si $b < a \leq \sqrt{2}b$, donde a y b son, respectivamente, los ejes mayor y menor de la elipse. Sin embargo, la tableta no da esta solución, sino otra, en el caso de que $2b^2 < a^2$.

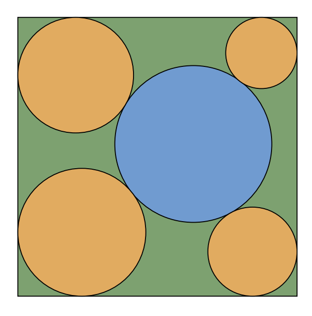
P

Q

Este hermoso problema, resoluble en geometría elemental, se encuentra en una tableta datada en 1913, en la Prefectura de Miyagi. En el triángulo verde grande se inscriben tres cuadrados. ¿Qué relación existe entre los radios de estos tres círculos azules?



En este problema, procedente de un *sangaku* descubierto en la Prefectura de Gumma, la base de un triángulo isósceles descansa sobre un diámetro del gran círculo verde. Este diámetro es también bisector del círculo rojo, inscrito en el círculo verde, de modo que sólo lo toque en un punto y que pase por un vértice del triángulo. El círculo azul está inscrito de forma que sea tangente exterior al círculo rojo y al triángulo, y tangente interior al círculo verde. Un segmento rectilíneo conecta el centro del círculo azul y el punto de intersección del círculo rojo y del triángulo. Demuéstrese que este segmento es perpendicular al diámetro dibujado del círculo verde.



Este problema está tomado de una tableta de 1874, en Gumma. Un gran círculo azul se encuentra en el interior de un cuadrado. Cuatro círculos naranja más pequeños, todos de distinto radio, tocan al círculo azul, así como a los lados adyacentes del cuadrado. ¿Qué relación existe entre los radios de los cuatro círculos menores y la longitud del lado del cuadrado? (El problema puede resolverse aplicando el teorema de Casey, que establece la relación entre cuatro círculos tangentes a un quinto círculo o a una línea recta.)

Soluciones al final del artículo

rato de la prefectura de Aichi, en el camino de Tokio a Osaka. Hará unos 30 años que Fukagawa decidió estudiar la historia de la matemática de su país, con la esperanza de poder enseñar mejor. Una alusión a las tablillas matemáticas en un viejo libro de biblioteca le causó un gran asombro, pues jamás había tenido noticia de cosa tal. Desde entonces, Fukagawa ha viajado mucho por Japón para estudiar las tablillas y ha recopilado una colección de libros que tratan, no sólo de los *sangaku*, sino del campo general de la matemática tradicional japonesa.

Para efectuar tal investigación, Fukagawa tuvo primero que aprender *kambun*, una forma arcaica del japonés, emparentada con el chino. El *kambun* es el equivalente japonés del latín; durante el período Edo (1603-1867), las obras científicas se escribían en este idioma; en el Japón moderno son muy pocos quienes lo leen con fluidez. Cuando aparecían nuevas tabletas, Fukagawa era invitado a descifrarlas. En 1989, Fukagawa, en colaboración con Daniel Pedoe, publicó la primera colección de *sangaku* en inglés. La mayoría de los problemas geométricos que acompañan este artículo se han tomado de esa compilación.

Aunque no es posible fijar con exactitud el origen de los *sangaku*, sí puede ser localizado. Existe en japonés una palabra, *wasan*, que se utiliza para aludir a la matemática autóctona. *Wasan* se contrapone a *yosan*, que es la matemática occidental. Para comprender cómo pudo llegar a existir la *wasan* —y con ella, los insólitos problemas *sangaku*— hemos de indagar primero en la peculiar historia de la matemática japonesa.

Es muy poco lo que se sabe de fijo sobre los orígenes de las matemáticas en Japón, excepto que conocieron un sistema de notación exponencial, similar al de Arquímedes en *El Arenario*. Los datos más concretos se remontan sólo hasta mediados del siglo VI d.C., cuando el budismo —y con él, la matemática china— entró en Japón. A juzgar por las obras enseñadas en las escuelas oficiales a comienzos del siglo VIII, los historiadores infieren que el Japón habría importado los clásicos chinos de aritmética, álgebra y geometría.

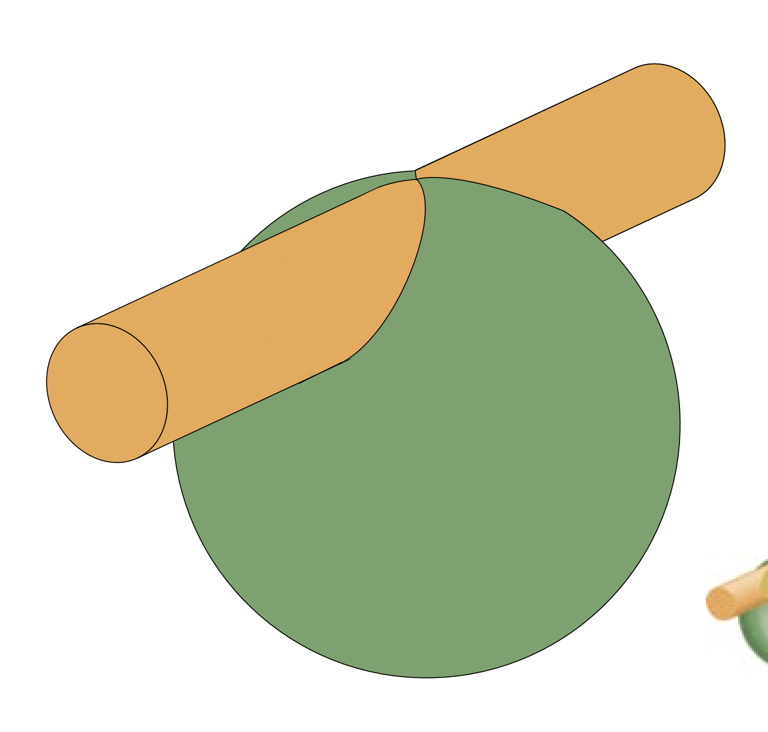
La más antigua de éstas es, según la tradición, la *Chou-pei Suan-ching*, que contiene un ejemplo del teorema de Pitágoras y un diagrama comúnmente utilizado para demostrarlo. Esta parte del tomo se remonta, por lo menos, hasta el siglo VI a.C.

TONY ROTHMAN, formado en la Universidad de Texas en Austin, se forjó como investigador en Oxford, Moscú y Ciudad del Cabo. Ha enseñado en Harvard. Hidetoshi Fukagawa, doctor en matemática y profesor en su Japón natal, le ha ayudado en la preparación de este manuscrito.

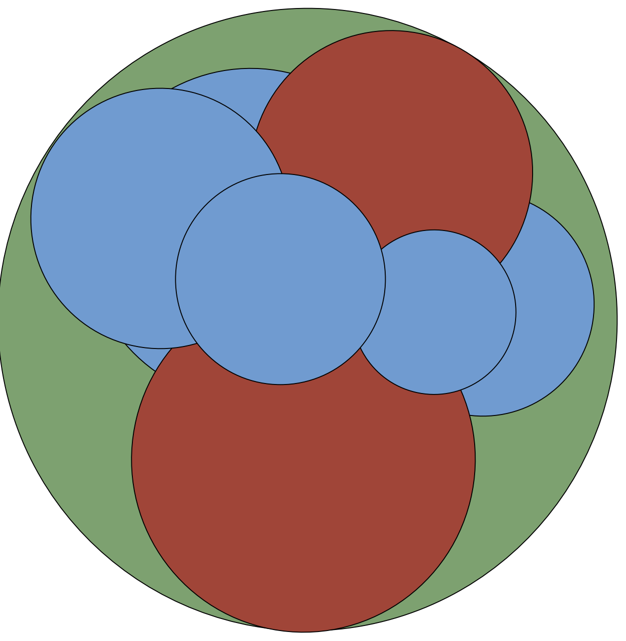
El *Chiu-chang Suan-shu*, el más influyente de los libros chinos de matemáticas, supone un estadio de conocimientos más avanzado. El *Chiu-chang* describe métodos para calcular las áreas de triángulos, cuadriláteros, círculos y otras figuras. Contiene, asimismo, sencillos problemas de enunciado, como los que atormentan hoy a nuestros alumnos de secundaria: “Si cinco bueyes y dos ovejas cuestan ocho taels de oro, y si dos bueyes y ocho ovejas cuestan ocho taels, ¿cuánto cuesta cada animal?” También son inciertas las fechas del *Chiu-chang*, pero es probable que en su mayor parte se compusiera hacia el tercer siglo antes de Cristo. De ser correcta tal información, pudiera ser que *Chiu-chang* presentara la primera alusión conocida a los números negativos, así como una temprana versión de la ecuación de segundo grado. (Según ciertos historiadores, los egipcios habían empezado a estudiar ecuaciones de segundo grado antes del año 2000 a.C.)

Pese al influjo de la cultura china, las matemáticas no arraigaron en Japón por aquella época. El país se hundió en una especie de edad obscura, más o menos coetánea de la de Europa occidental. En Occidente, las iglesias y monasterios se convirtieron en centros de cultura; en Japón, aunque los templos budistas realizaron una función pareja, las matemáticas no parecen haber desempeñado en ellos gran papel. Según ciertas descripciones, durante el shogunato Ashikaga (1338-1573) difícilmente cabía hallar en todo Japón una persona versada en el arte de la división.

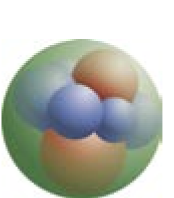
Hay que esperar a los comienzos del siglo XVII para hallar registros históricos de matemáticos japoneses. El primero de ellos es Kambei Mori (*floruit* en torno al año 1600). A pesar de que sólo ha llegado a nuestros días una de las obras de Mori —un cuadernito—, se sabe que tuvo importante papel en el desarrollo de las operaciones aritméticas en

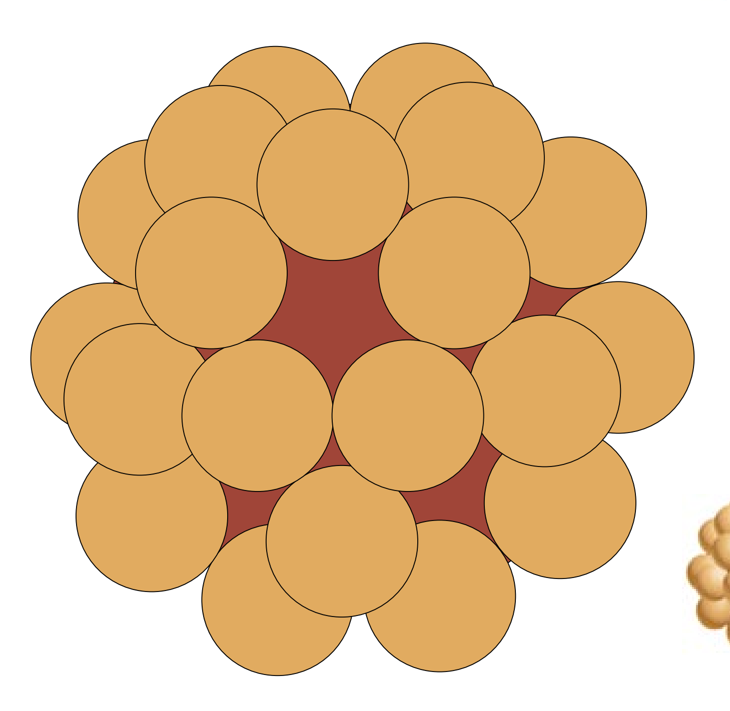


Es probable que este problema, tomado de un *sangaku* fechado en 1825, fuera resuelto mediante el *enri*, o "principio del círculo" japonés. Un cilindro intercepta a una esfera, de tal forma que el exterior del cilindro es tangente al interior de la esfera. ¿Qué área tiene la porción de superficie cilíndrica contenida en la esfera? (En el inserto se ofrece una vista en transparencia del problema.)



Este problema está en una tablilla de 1822, en la Prefectura de Kanagawa. Se anticipa en más de un siglo a un teorema de Frederick Soddy, que descubrió, con Ernest Rutherford, la transmutación de los elementos. Dos esferas rojas, en contacto, tocan también a la gran esfera verde por el interior. Un "collar" de esferas azules, más pequeñas y de distinto tamaño, rodea la "garganta" que media entre las esferas rojas. Cada esfera azul del "collar" es tangente a sus vecinas más cercanas, y todas, a su vez, tocan a las esferas rojas y a la verde. ¿Cuántas esferas azules ha de haber? ¿Qué relación existe entre los radios de las esferas azules? (En el inserto se ofrece una vista en transparencia del problema.)





Hidetoshi Fukagawa estaba tan fascinado con este problema, fechado en 1798, que construyó un modelo de madera. Sea una esfera grande rodeada por 30 esferas menores, idénticas, cada una de las cuales toca a sus cuatro esferas pequeñas vecinas, así como a la esfera grande. ¿Qué relación existe entre el radio de la esfera grande y el de las esferas pequeñas? (En el inserto se ofrece un vista en transparencia del problema)

Soluciones
al final del artículo

el *soroban*, el ábaco japonés, y en popularizarlo por el país.

La más antigua de las obras matemáticas de importancia que existe en la actualidad pertenece a Kuru Yoshida (1598-1672), discípulo de Mori. El libro, titulado *Jinko-ki* (literalmente, "números grandes y pequeños"), apareció en 1627 y se ocupa también de operaciones en el *soroban*. Tal fue el peso de *Jinko-ki*, que el nombre de la obra ha sido, muchas veces, sinónimo de aritmética. Debido a la influencia que ejerció, en la matemática tradicional japonesa fue el cómputo, y no la lógica, el componente de mayor importancia. De tener sentido adscribir a personas concretas la fundación del *wasan*, es probable que tal honor corresponda a Mori y a Yoshida.

La matemática *wasan,* empero, no fue tanto creación de unos pocos, cuanto resultado de algo mucho mayor. En 1639, el shogunato Tokugawa (que gobernó durante el período Edo) decretó, para reforzar su poder y reducir la oposición a su reinado, el aislamiento oficial de Japón. Durante esta época de *sakoku*, o clausura nacional, el gobierno prohibió los libros extranjeros y los viajes al exterior, persiguió a los cristianos y prohibió acercarse a sus costas a los barcos portugueses y españoles. Muchas de estas imposiciones persistieron hasta que el comodoro Matthew C. Perry, respaldado por la escuadra estadounidense, obligó a poner fin al *sakoku* en 1854.

La política aislacionista no fue totalmente negativa. De hecho, durante las postrimerías del siglo XVII, el arte y la cultura florecieron con brillo singular, hasta el punto de que aquellos años fueron los del *Genroku*, "renacimiento". El *haiku* se convirtió en una de las bellas artes; el teatro No y Kabuki alcanzaron el pináculo de su desarrollo; nacieron las imágenes *ukiyo-e*, o sea, "mundo flotante"; las ceremonias del té y el arreglo de las flores alcanzaron nuevas cotas. Tampoco las matemáticas quedaron rezagadas, pues *Genroku* fue también la época en que vivió Kowa Seki.

Según leyendas populares, Seki (1642-1708) fue el homólogo japonés de Isaac Newton o de Gottfried Wilhelm Leibniz, a pesar de que tal reputación resulte difícil de sustanciar. De ser correcto el número de manuscritos a él atribuidos, tendríamos que la mayor parte de su obra se ha perdido. A pesar de ello, no cabe duda de que Seki dejó gran número de discípulos, que pesaron fuertemente en el ulterior desarrollo de las matemáticas japonesas.

El primero, e incontestable, de los logros de Seki fue su teoría de determinantes, más potente que la de Leibniz, y que precede a la obra del matemático alemán en diez años, por lo menos. Otro logro, más pertinente a la geometría de los templos, aunque de origen debatible, es el desarrollo de métodos para la resolución de ecuaciones de grado superior. (Gran parte de la matemática tradicional japonesa de aquella época se ocupa de ecuaciones de grado hasta de varios centenares; una de tales ecuaciones es de grado 1458.) No obstante, un tercer logro, no pocas veces atribuido a Seki, y que podría afectar a los *sangaku*, es el desarrollo del *enri*, o "principio del círculo".

El *enri* era muy similar al método de exhaustación desarrollado en la Grecia clásica por Eudoxo y Arquímedes para calcular el área de un círculo. La diferencia principal residía en que Eudoxo y Arquímedes se sirvieron de polígonos de n lados para la aproximación del círculo, mientras que el *enri* dividía el círculo en n rectángulos. En consecuencia, el proceso de paso al límite era algo diferente. Sea como fuere, el *enri* constituía una forma rudimentaria de cálculo integral, posteriormente generalizado a otras figuras, entre ellas, a esferas y elipses. También se elaboró en el mismo período cierto tipo de cálculo diferencial. Resulta concebible que el *enri* y otras técnicas similares se utilizaran en los *sangaku*. Los matemáticos de nuestros días se valdrían del moderno cálculo diferencial o integral para resolver estos problemas.

En vida de Seki se publicaron los primeros libros que utilizaban el *enri*, y es evidente que aparecieron también los primeros *sangaku*. Es casi seguro que las fechas no se deben a mera coincidencia; los seguidores de Yoshida y Seki tienen que haber influido en el desarrollo de la *wasan*, y la *wasan*, a su vez, pudo haber influido en ellos. Fukagawa cree que Seki encontró *sangaku* yendo de camino al castillo del shogun, donde desempeñaba el cargo oficial de matemático de corte, y que las tablillas le impulsaron a efectuar investigaciones ulteriores. ¿Una leyenda? Tal vez. Pero en el siglo siguiente se estaban publicando libros que contenían problemas japoneses autóctonos: círculos contenidos en triángulos, esferas inscritas en pirámides, elipsoides circunscritos a esferas. Los problemas que encontramos en estos libros no difieren demasiado de los hallados en las tablillas, y resulta difícil no concluir que el peculiar sabor de todos los problemas *wasan* —y entre ellos, los *sangaku*— son consecuencia directa de la política de clausura nacional.

Pero, ¿fue absoluto el aislamiento de Japón? Es cierto que aparte de los holandeses autorizados a permanecer en el puerto de Nagasaki, en Kyushu, la isla más meridional, todos los comerciantes occidentales fueron prohibidos. Está igualmente claro que los propios japoneses sufrieron severas restricciones. El mero hecho de viajar al extranjero era considerado alta traición, y su pena, la muerte. Podemos, pues, suponer con certeza que, de no ser el aislamiento absoluto, muy cerca hubo de estar de serlo, y que cualquier influencia extranjera sobre la matemática japonesa tendría que haber sido insignificante.

La situación empezó a cambiar en el siglo XIX, cuando la *wasan* dejó, poco a poco, paso a la *yosan*, proceso que produjo manuscritos híbridos escritos en *kambun* con notaciones matemáticas occidentales. Y tras la apertura de Japón por el comodoro Perry, y el subsiguiente hundimiento del shogunato Tokugawa en 1867, el nuevo gobierno abandonó el estudio de la matemática autóctona en favor de la *yosan*. Algunos fieles continuaron, sin embargo, colgando tabletas hasta bien adentrado el siglo XX. Incluso hay unos pocos *sangaku* fechados en nuestro decenio. Pero casi todos los problemas de nuestro siglo son plagios.

¿Quién produjo los *sangaku*? Esos teoremas bellamente delineados sobre tablillas de madera, ¿fueron obra de matemáticos profesionales o trabajos de aficionados? Las pruebas son escasas.

En la obra de referencia obligada, *A History of Japanese Mathematics*, de David E. Smith y Yoshio Mikami, se menciona sólo un puñado de *sangaku*. Estos autores citan la colección *Shimpeki Sampo* (1789), o sea, *Problemas matemáticos suspendidos ante el templo*, que fue publicada por Kagen Fujita, matemático profesional. Smith y Mikami mencionan una tableta en la que, tras la solución, fue añadido lo siguiente: "Distrito feudal de Kakegawa en la Provincia Enshu, tercer mes de 1795, Sonobei Keichi Mayajima, discípulo de Sadasuke Fujita, de la Escuela de Seki." Mikami, en su *Development of Mathematics in China and Japan*, menciona el

Obras de arte

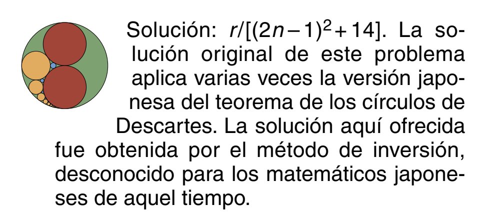
Se pueden hallar *sangaku* en santuarios sintoístas y en templos budistas de Japón (*foto contigua, a la derecha*). Las tablillas caen suspendidas bajo los aleros de los tejados de los edificios religiosos, según una costumbre centenaria de los devotos, que ofrecen tablillas de madera en homenaje a los espíritus que los guían (*derecha, centro*). Los *sangaku* contienen problemas matemáticos que casi siempre tratan de geometría (*a la derecha de la página*). Muchas tabletas están coloreadas con primor (*abajo, a la izquierda*); algunas, incluso, tienen incrustaciones de oro (*abajo, a la derecha*). —*T.R.*



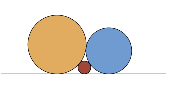


Soluciones de los problemas *sangaku*

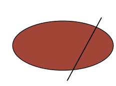
Por limitaciones de espacio, no es posible presentar aquí la solución completa de los problemas.



Solución: $r/[(2n-1)^2+14]$. La solución original de este problema aplica varias veces la versión japonesa del teorema de los círculos de Descartes. La solución aquí ofrecida fue obtenida por el método de inversión, desconocido para los matemáticos japoneses de aquel tiempo.

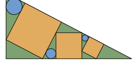


Solución: $1/\sqrt{r_3} = 1/\sqrt{r_1} + 1/\sqrt{r_2}$, en donde r_1, r_2 y r_3 son los radios de los círculos naranja, azul y rojo, respectivamente. El problema puede resolverse aplicando el teorema de Pitágoras.

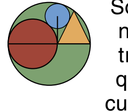


Respuesta: $PQ = \frac{\sqrt{27}a^2b^2}{(a^2+b^2)^{3/2}}$

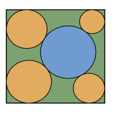
El problema puede resolverse mediante geometría analítica. Se deduce una fórmula para PQ y se calcula después la derivada primera de la correspondiente función, para hallar el valor mínimo de PQ. Se desconoce si los autores recurrieron al cálculo diferencial para resolver este problema.



Solución: $r_2{}^2 = r_1r_3$, donde r_1, r_2 y r_3 son los radios de los círculos grande, mediano y pequeño, respectivamente. (Con otras palabras, r_2 es la media geométrica de r_1 y r_3.) El problema puede resolverse observando que todos los triángulos verdes interiores formados por los cuadrados naranja son semejantes. En la solución original se procede entonces a ver qué relación existe entre los cuadrados.

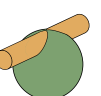


Solución: En la solución original de este problema, el autor traza un segmento rectilíneo que pasa por el centro del círculo azul y es perpendicular al diámetro dibujado del círculo verde. El autor supone que este segmento es distinto del segmento descrito en el enunciado del problema del primer recuadro. Así pues, los dos segmentos deberían interceptar al diámetro en puntos distintos. El autor demuestra entonces que la distancia entre estas dos posiciones tiene que ser necesariamente igual a cero, es decir, que los dos segmentos rectilíneos son idénticos, con lo que demuestra la perpendicularidad.

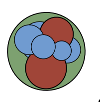


Solución: Si denotamos a al lado del cuadrado, y si r_1, r_2, r_3 y r_4 son, respectivamente, los radios de los círculos superior derecho, superior izquierdo, inferior izquierdo e inferior derecho, entonces

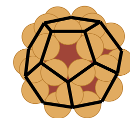
$$a = \frac{2(r_1r_3-r_2r_4)+\sqrt{2(r_1-r_2)(r_1-r_4)(r_3-r_2)(r_3-r_4)}}{r_1-r_2+r_3-r_4}$$



Solución: $4r^2\mathrm{arcsen}(t/r) - 4r\sqrt{(rt)} - t^2$, donde r y t son los radios de la esfera y del cilindro, respectivamente.



Solución: Seis esferas. El "teorema del sexteto" de Soddy enuncia que ha de haber seis, y solamente seis, esferas azules (de aquí "sexteto"). Vale la pena señalar que el teorema es verdadero con independencia de la posición que ocupe la primera esfera azul en torno a la garganta. Otro resultado intrigante es que los radios de las diferentes esferas azules del "collar" (de t_1 a t_6) están relacionadas por la ecuación $1/t_1 + 1/t_4 = 1/t_2 + 1/t_5 = 1/t_3 + 1/t_6$.

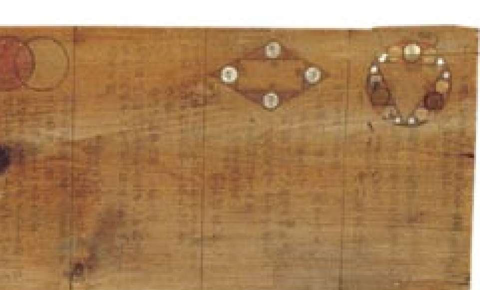


Solución: $R = \sqrt{5}r$, donde R y r son los radios de las esferas grande y pequeña, respectivamente. El problema puede resolverse comprendiendo que el centro de cada esfera pequeña se encuentra en el punto medio de la arista de un dodecaedro regular, o sea, de un cuerpo geométrico regular de 12 caras pentagonales.











"Problema del Templo de Gion", que fue colgado en el templo de Gion en Kyoto por Enkyu Tusda, discípulo de Enri Nishimura. Además, las tabletas estaban escritas en el lenguaje especializado de *kambun*, denotativo de una clase culta de practicantes.

Ante esa información fragmentaria, nos sentimos inclinados a pensar que las tabletas eran primordialmente obra de matemáticos profesionales y de sus alumnos. Existen, no obstante, razones para opinar de distinta manera.

Muchos problemas, elementales, se resuelven en pocas líneas; no son el tipo de trabajo que un matemático profesional publicaría. Fukagawa ha descubierto una tableta procedente de la Prefectura de Mie, en la que está inscrito el nombre de un mercader. Otras llevan los nombres de mujeres o niños, de 12 a 14 años de edad. La mayoría, según Fukagawa, fueron creadas por miembros de clase samuray, de elevada educación. Unas pocas fueron, probablemente, realizadas por hombres del campo; Fukagawa recuerda que, hará unos diez años, visitó la que fue casa de campo del matemático Sen Sakuma (1819-1896), que enseñaba *wasan* en las aldeas cercanas en la Prefectura de Fukushima. Sakuma tuvo alrededor de 2000 alumnos.

Tal instrucción nos evoca el período Edo, durante el cual no hubo en Japón universidades ni centros de enseñanza superior. Las enseñanzas se impartían en escuelas privadas o en los templos, a los que acudía el pueblo llano para aprender a leer, escribir y manejar el ábaco. Dado que el pueblo llano se siente más atraído por los problemas de geometría que por los de álgebra, no sería de extrañar que las tabletas fueran pintadas con tan gran cuidado artístico con el fin específico de atraer a los no matemáticos.

La mejor respuesta, pues, a la pregunta de quién fue el creador de la geometría votiva de los templos parece ser: fuenteovejuna. Al estudiar los *sangaku*, Fukagawa llegó al convencimiento de que, en aquellos tiempos, eran muchos los japoneses que amaban y disfrutaban de las matemáticas, así como de la poesía y de otras formas de arte.

Resulta grato reconocer que algunos *sangaku* fueron obra de personas ordinarias, devotas de la matemática, prendadas de la belleza de la geometría. Tal vez un maestro de aldea, tras pasar el día con sus alumnos, o quizás un guerrero samuray, tras afilar su espada, se retirasen a su estudio, encendieran una lámpara de aceite y se olvidaran del mundo enfrascados en un intrincado problema sobre esferas y elipsoides.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICS IN CHINA AND JAPAN. Segunda edición (reimpresión). Yoshio Mikami. Chelsea Publishing Company, Nueva York, 1974.

JAPANESE TEMPLE GEOMETRY PROBLEMS. H. Fukagawa y D. Pedoe. Charles Babbage Research Foundation, Winnipeg, Canadá, 1989.

TRADICIONAL JAPANESE MATHEMATICS PROBLEMS FROM THE 18TH AND 19TH CENTURIES. H. Fukagawa y D. Sokolowsky. Science Culture Technology Publishing, Singapur (en prensa).

El canto de la cigarra

El diseño entero de la cigarra macho, el más ruidoso de los insectos, se ordena al canto. Su instrumento emisor interno reviste una sorprendente complejidad

Henry C. Bennet-Clark



En muchos lugares del mundo, y en el atardecer de un día cualquiera de finales de primavera, puede orquestarse una sinfonía insoportable. Cada año numerosas especies de cigarras, de las miles que existen, emergen del suelo y los machos empiezan a entonar su canto estridente, casi ensordecedor. Entre esos virtuosos del mundo de los insectos, sobresale el macho de una cigarra australiana (*Cyclochila australasiae*) con su llamada, la más gritona entre las medidas hasta el presente.

Transmitiendo a 100 decibelios en un rango de un metro y a una frecuencia de 4,3 kilohertz, esta cigarra emite un chirrido cuyo volumen e intensidad se asemejan a una alarma personal que se hubiera disparado. Y eso si no es que el macho, en vez de estar cantando solo, se encuentra acompañado de un coro de cientos, miles incluso, de compañeros. En ese caso, el efecto es similar al de una multitud de alarmas activadas a la vez.

El mecanismo en cuya virtud estas criaturas más o menos insignificantes —miden unos 60 milímetros de longitud—emiten semejante chirrido zumbante ha permanecido envuelto en el misterio hasta hace poco. En 1945, J. W. S. Pringle publicó un primer artículo sobre el sonido emitido por las cigarras, al que siguió un período de relativo silencio en el tema. Durante los siete últimos años, David Young, de la Universidad de Melbourne, y el autor han centrado sus investigaciones en el estudio de la acústica y la mecánica de estos insectos. (Young ha dedicado 20 años a la biología de las cigarras.) Por mi parte, desarrollé unos micrófonos sonda mínimos y con ellos observamos varios aspectos del maravilloso sistema de sonido de *C. australasiae*, que paso a exponer.

Las cigarras, emparentadas con pulgones y saltamontes, chupan los fluidos de las plantas. Entre los insectos chupadores de savia, que van desde 10 milímetros los más pequeños, hasta 100 milímetros los mayores, destacan por su tamaño (grande) y ruido producido. La hembra de las cigarras deposita los huevos en los tallos de las plantas o en los árboles. Posteriormente, los individuos eclosionados caen al suelo; y lo excavan en busca de raíces que roer. Pasan en el interior del suelo toda la vida larvaria, que puede durar varios años; los ciclos biológicos de entre 13 y 17 años observados en las cigarras americanas se cuentan entre los más largos. Cuando la larva emerge, muda a adulto alado y vive en ese estado durante unas pocas semanas. A lo largo de este período, el macho canta con toda su energía para atraer una pareja. (Las cigarras emiten también otros tipos de canto, como sonidos de protesta o, incluso, un suave chirrido de cortejo.)

No acaba de conocerse bien la razón del volumen chillón del canto de llamada. Pudiera deberse a que el



CIGARRA AUSTRALIANA (*Cyclochila australasiae*), una del largo centenar de especies conocidas. El macho emite el canto de llamada más chillón de todos los insectos registrados hasta ahora.

sonido saturase el oído de los depredadores, dificultando con ello la localización precisa de la cigarra. Pudiera ocurrir, asimismo, que las cigarras de mayor talla ocuparan un territorio mayor y necesitaran llamar más fuerte para atraer una pareja. Sabemos que las hembras no son duras de oído: oyen lo suficientemente bien, con umbrales de entre 30 y 40 decibelios. Y es bastante probable que la hembra de cigarra pueda distinguir un macho de otro en razón de la calidad y cantidad del sonido, exactamente igual que lo observado en las hembras del grillo.

Para entender el mecanismo subyacente bajo el potente chirrido emitido por los machos, el método indicado es el de aislar sus componentes. El elemento principal es un par de timbales, o estructuras en forma de tambor, que se alojan en sendas cavidades, una a cada lado del abdomen. Cada uno de estos órganos elásticos y resonantes posee una serie de cuatro nervaduras convexas que discurren longitudinalmente arriba y abajo de su superficie. Dichas nervaduras están flexiblemente conectadas entre sí y a una ancha placa oval situada detrás del timbal.

A su vez, cada placa oval del timbal se halla conectada a un gran músculo de contracción rápida. La contracción de estos músculos distorsiona el timbal en su cavidad y produce un pulso de sonido. Dado que ambos músculos se contraen alternativamente a 120 hertz cada uno, el sonido producido por los timbales tiene una modulación de 240 hertz. (Un hertz es una unidad de frecuencia que mide un ciclo por segundo; un kilohertz significa, pues, una frecuencia de 1000 ciclos por segundo.)

Al contraerse con tanta rapidez, los músculos producen suficiente energía en los tres primeros milisegundos de cada contracción como para que dos o tres de las nervaduras curvadas de cada timbal se arqueen de forma secuencial. Este movimiento provoca dos o tres movimientos consecutivos hacia el interior de la placa oval. La energía elástica almacenada que se libera durante esos movimientos consecutivos produce un clic fuerte y breve, mientras se arquean las nervaduras. Esta serie de clics se funden y crean un tren de vibraciones a la frecuencia de sonido de la cigarra, que es de 4,3 kilohertz.

Un clic de la nervadura del timbal produce potencias de sonoridad muy altas —de hasta 158 decibelios— en el interior del abdomen de la cigarra. (Se trata de una presión similar a la que ejerce la explosión de una granada a un metro de distancia.) En muchas especies de cigarra, esa región está ocupada en gran parte por

HENRY C. BENNET-CLARK, profesor de zoología de invertebrados en la Universidad de Oxford, estudia bioacústica y biomecánica de insectos; en ese dominio investiga, por ejemplo, el salto de los insectos y las propiedades mecánicas de los materiales esqueléticos de los mismos. Sus trabajos con moscas de la fruta le llevaron a desarrollar un micrófono capaz de registrar los leves y maravillosos sonidos de esas diminutas criaturas.

un saco de aire. En nuestra cigarra australiana el saco abarca un volumen de 1,8 mililitros, de manera que ocupa el 70 por ciento del abdomen del insecto. El abdomen presenta un par de finos tímpanos que se extienden por la superficie ventral y actúan a la manera de ventanas acústicas, conectando el saco de aire con el mundo exterior.

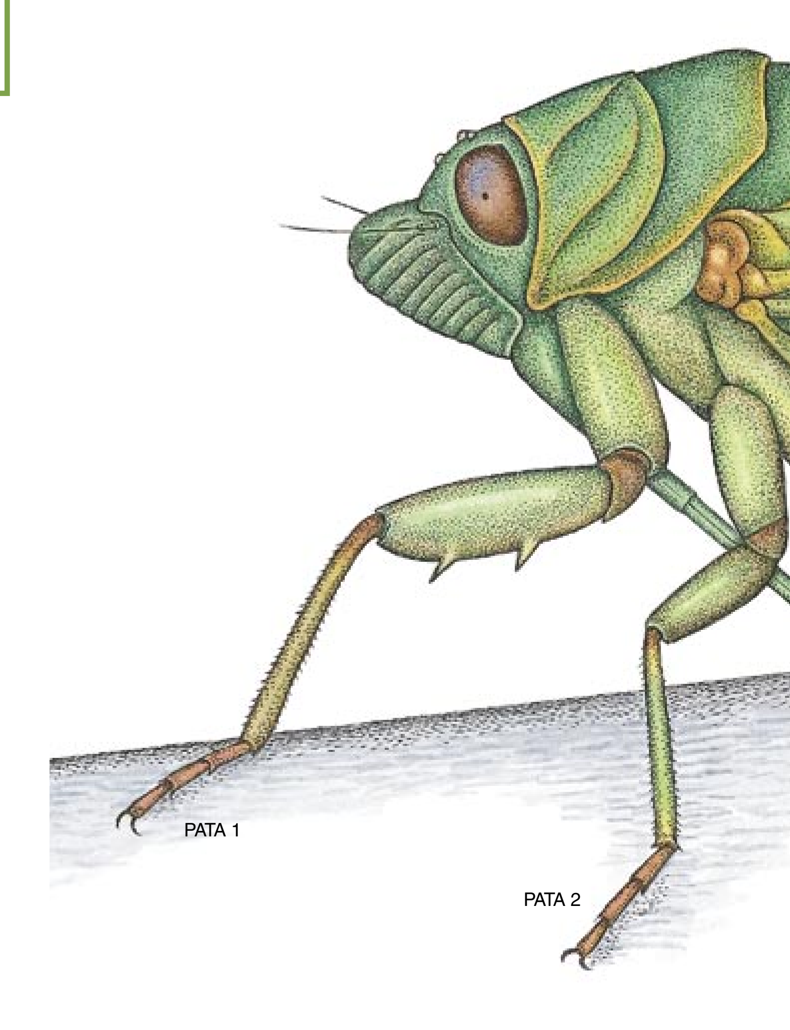
La alta presión de los pulsos de sonido producidos por los timbales y las nervaduras crea una resonancia por simpatía en el saco abdominal de aire. Por ser mayores que los timbales, los tímpanos constituyen un eficaz medio para la difusión del sonido más allá del cuerpo. Así provocan que la emisión sea unas 20 veces más fuerte de lo que resultaría si simplemente emanara de los pequeños timbales. El insecto se las ingenia, pues, para que su emisión llegue a una distancia mucho mayor.

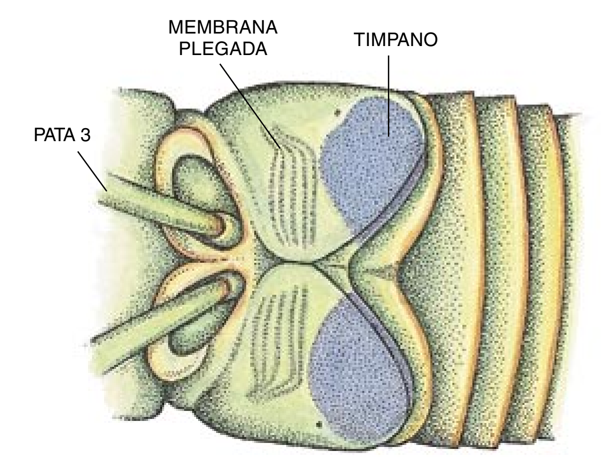
Sorprendentemente, ese sonido de 158 decibelios no hace saltar en añicos el oído del macho que lo produce. Aunque el chirrido resuena a través de los tímpanos, la parte sensorial del oído del macho se halla en una cápsula separada, que conecta con el tímpano a través de un canalículo. Esta separación parece evitar que los machos se queden sordos, aunque no podemos afirmarlo con rotundidad.

El abdomen y los tímpanos no se limitan a conducir el sonido hasta el mundo exterior. Sirven para mantener la calidad de la importantísima llamada de cópula. Extendiendo el abdomen y abriendo los opérculos que cubren los tímpanos, la cigarra puede modular el resonador abdominal ajustándolo a los 4,3 kilohertz de frecuencia de los pulsos de sonido producidos por los timbales. Las estructuras abdominales pueden, pues, incrementar el volumen o la pureza del sonido. De hecho, actúan como lo que en terminología musical sería una carga acústica resonante de los timbales, es decir, corrigen y equilibran el sistema de sonido.

Un mecanismo semejante parece darse también en otras especies de cigarras; en otros insectos chirriadores se reconocen sistemas de producción de sonido similares. Sin embargo, y por lo que sabemos, el macho de esta cigarra australiana sigue siendo el insecto más ruidoso de todos (y los residentes de Melbourne y de Sydney tienen buenas razones para confirmarlo...).

Anatomía del canto de la cigarra



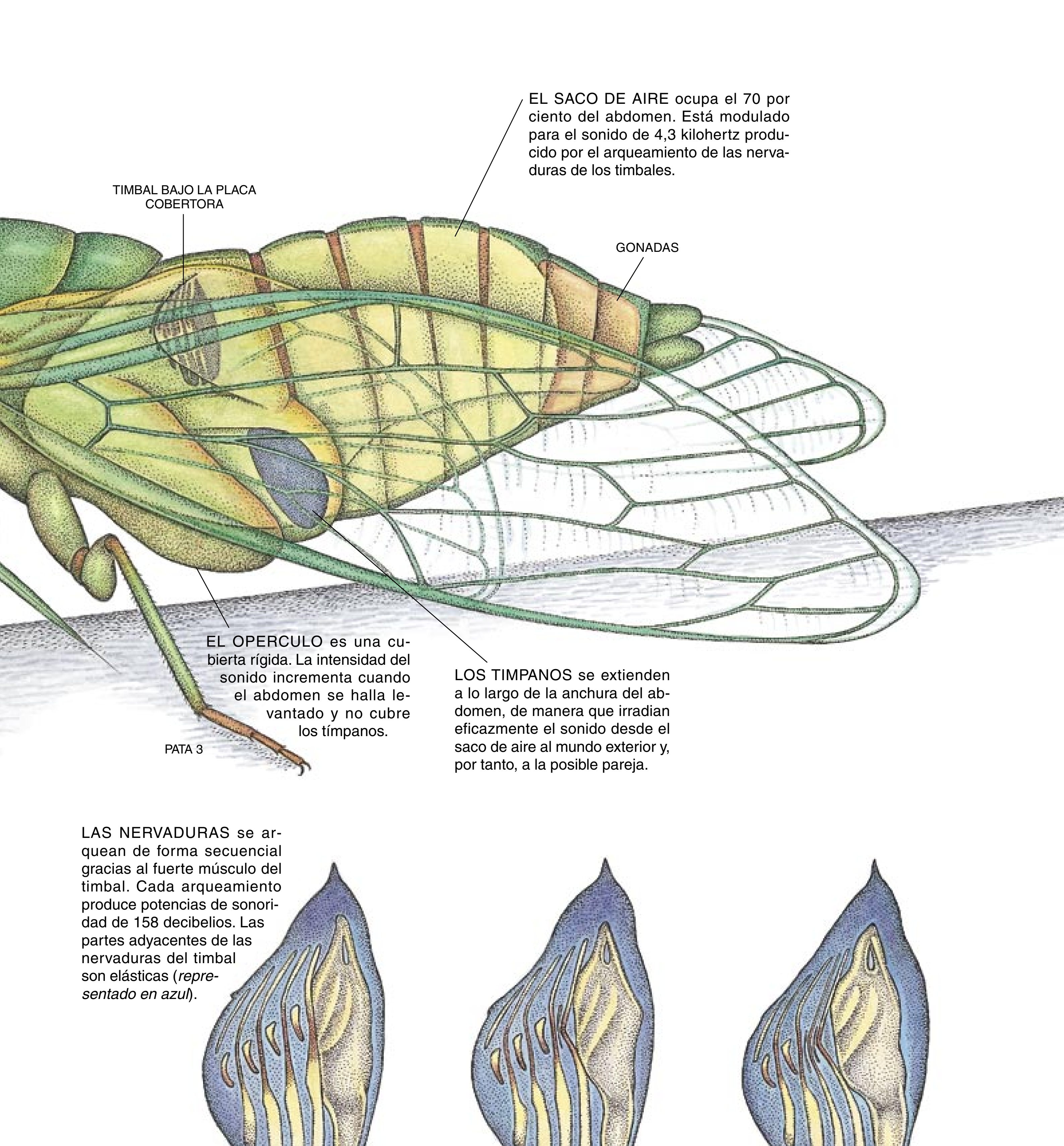


VISION VENTRAL

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A MODEL OF THE MECHANISM OF SOUND PRODUCTION IN CICADAS. H. C. Bennet-Clark y D. Young en *Journal of Experimental Biology*, vol. 173, páginas 123-153; 1992.

THE ROLE OF THE TYMBAL IN CICADA SOUND PRODUCTION. D. Young y H. C. Bennet-Clark en *Journal of Experimental Biology*, vol. 198, páginas 1001-1019; 1995.

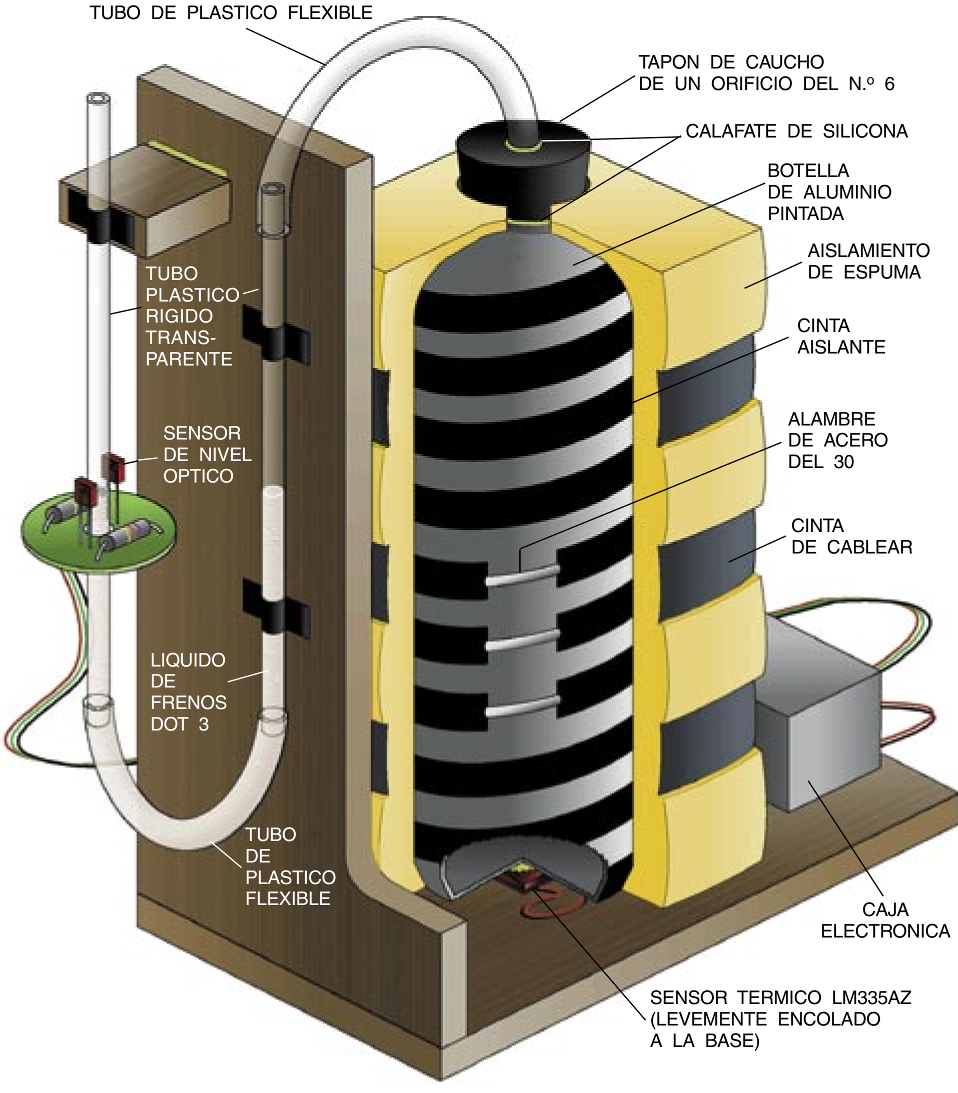

EL SACO DE AIRE ocupa el 70 por ciento del abdomen. Está modulado para el sonido de 4,3 kilohertz producido por el arqueamiento de las nervaduras de los timbales.
TIMBAL BAJO LA PLACA COBERTORA
GONADAS
EL OPERCULO es una cubierta rígida. La intensidad del sonido incrementa cuando el abdomen se halla levantado y no cubre los tímpanos.
LOS TIMPANOS se extienden a lo largo de la anchura del abdomen, de manera que irradian eficazmente el sonido desde el saco de aire al mundo exterior y, por tanto, a la posible pareja.
PATA 3
LAS NERVADURAS se arquean de forma secuencial gracias al fuerte músculo del timbal. Cada arqueamiento produce potencias de sonoridad de 158 decibelios. Las partes adyacentes de las nervaduras del timbal son elásticas (*representado en azul*).
TIMBAL EN REPOSO
TIMBAL CON LA NERVADURA 1 ARQUEADA
TIMBAL CON LAS NERVADURAS 1 Y 2 ARQUEADAS

Shawn Carlson

Detector de tsunamis

Mañana de domingo. Empiezo el artículo del mes, sentado en un pequeño café que da al océano. Fuera, llueve a cántaros. La tempestad ha levantado unas olas gigantes. Esos jirones de energía recorren miles de kilómetros en avance acompasado, para acabar rompiendo en las playas del Pacífico. La contemplación de esos monstruos de agua retumbando sobre la arena me trae a la memoria otro tipo de onda pasajera. El mayor océano del mundo es la atmósfera y ella, también, alberga unas ondas enérgicas. Igual que sus primas oceánicas, las ondas atmosféricas acostumbran generarse en tormentas muy violentas. Pueden también surgir y propagarse, como las ondas en un estanque encalmado, cuando un meteoro o una erupción volcánica conmociona el aire.

Con todo, hasta el más fuerte de los tsunamis atmosféricos resulta muy difícil de detectar. Las variaciones de presión que delatan su paso son de escasos milibares (milésimas de atmósfera) y esas minúsculas oscilaciones a menudo tardan decenas de minutos, e incluso más, en pasar. Los instrumentos equipados para registrar tan sutiles señales se llaman microbarógrafos. Un modelo profesional puede costar varios miles de dólares. Pero, gracias a Paul Neher, aficionado de Las Cruces, cualquiera podrá observar tan efímeras ondas por 50 dólares.



1. Microbarógrafo construido con una botella de aluminio, alambre de acero y tubos de plástico

Neher emplea un manómetro (en este caso, un tubo en U con un sensor) [*véase la figura 1*] para equilibrar la presión barométrica frente a la presión del aire encerrado en una botella de aluminio que se mantiene un poco más caliente que el aire circundante. Como la presión de un gas aislado varía con la temperatura, cualquier cambio en la presión exterior puede igualarse variando la temperatura del gas de la botella. El instrumento de Neher capta las fluctuaciones de la presión exterior observando la altura de un líquido contenido en el manómetro. Un alza en la presión exterior comprime al líquido manómetro abajo y activa una bobina calefactora que caldea la botella. Si cae la presión, el nivel del líquido sube y la bobina calefactora se apaga, con lo que la botella se enfría un poco para compensar. Siguiendo los cambios de temperatura con el circuito que se representa aquí, se revelan los minúsculos cambios en la presión del aire.

Por recipiente de aluminio, Neher empleó una bomba manual de inflado de neumáticos (de un litro) que vació por completo; sustituyó su tapón fruncido de origen por un tapón de caucho con un orificio. Hizo el manómetro con un trozo de tubo de vidrio, que curvó valiéndose de un soplete de propano. Pero es posible unir dos tubos de plástico, rígidos y transparentes, mediante un trozo corto de manguera plástica flexible. El conjunto hay que llenarlo hasta un tercio con un líquido de baja viscosidad y que no se evapore. Neher recurrió al líquido de frenos.

El instrumento percibe las variaciones en el nivel de fluido haciendo que el líquido enfoque la luz procedente

de un diodo emisor de luz infrarroja sobre un fototransistor. Cuando el líquido desciende por debajo del punto de ajuste, la luz desenfocada se torna demasiado difusa para ser detectada. Ello provoca que el circuito unido al fototransistor envíe una corriente eléctrica a través del calefactor. Como filamento de caldeo, Neher empleó "alambre con cuentas", que consiguió en una tienda de suministros de artesanía. El alambre de acero de la galga 30 sirve para hacer collares, pero posee una resistencia del orden de tres ohms por metro que lo convierte en ideal para esta aplicación.

Tras aislar eléctricamente la botella con una capa de esmalte, se dan diez vueltas regularmente espaciadas a lo largo de la altura de la botella y se sujeta el alambre con cinta aislante. Una vez envuelta la botella, recúbrase con unos diez centímetros de espesor de un material refractario (gomaespuma) o un aislador rociado. En funcionamiento, el circuito caldea la botella cada 10 segundos más o menos, restituyendo el calor que se filtra a través del aislamiento, manteniendo así estable el nivel de líquido. El microcircuito LM335AZ es un termómetro de estado sólido de precisión cuya tensión de salida varía en 10 milivolt por cada grado centígrado de variación en la temperatura. Es una maravilla capaz de medir hasta 0,01 grado C, lo que corresponde a una resolución de presión cercana a los 20 microbares.

Para empezar las observaciones, se desconecta el tubo que une el manómetro con la botella y ésta se calienta luego unos 10 grados por encima de la temperatura ambiente obstaculizando el paso de la luz hasta el fototransistor. Se reconecta el tubo y se permite que el circuito estabilice la botella a esa temperatura alta. Es fácil comprobar si el instrumento está funcionando: basta con izarlo. Entonces debe registrar la caída de presión de 100 microbares correspondiente a levantarlo un metro.

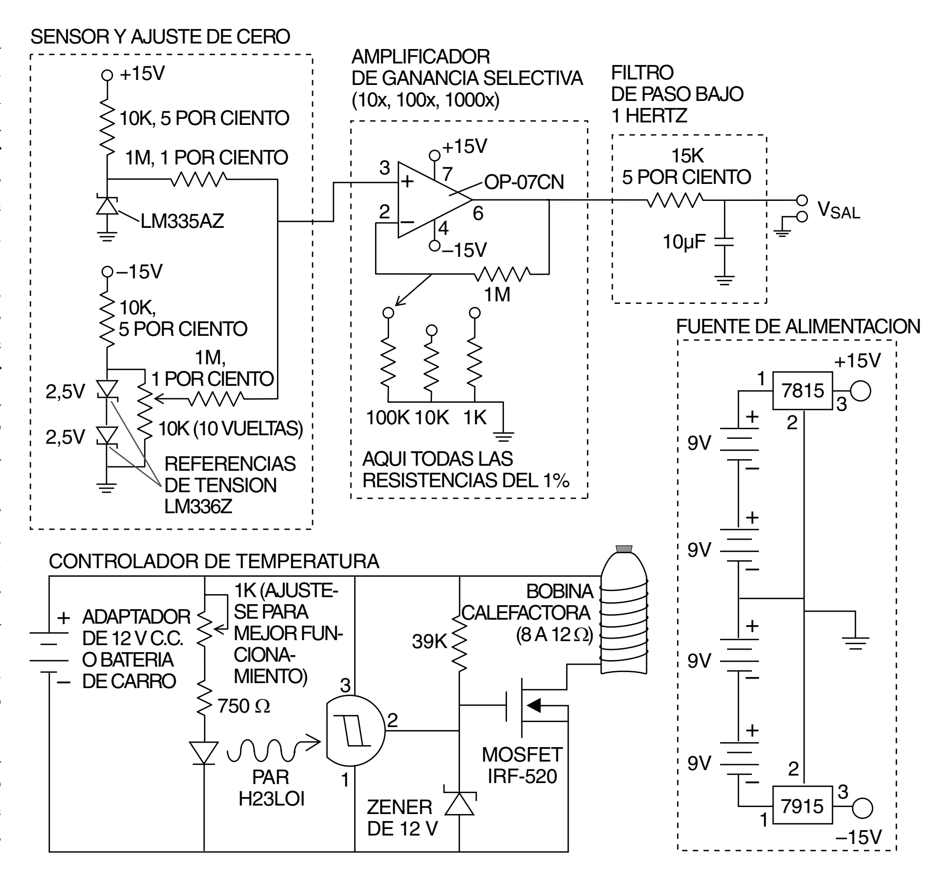
Pero deseamos calibrar al aparato para un intervalo mayor del que resulta de variar su altitud. La solución es muy simple: basta con subir o bajar el conjunto de diodo emisor y fototransistor a lo largo de la columna. Con ello el circuito ajustará la temperatura en el interior de la botella para que suba o baje el nivel del líquido entre el diodo y el fototransistor, de modo que compense. Esta operación provoca la irregularidad del nivel del líquido, con el peso del líquido sin equilibrar mantenido por la diferencia de presión entre la atmósfera y el aire del interior de la botella. La densidad relativa del líquido de frenos DOT 3, común en EE.UU., es 1,05. Para ese valor, cada diferencia en un centímetro en el nivel del líquido corresponde a una diferencia de presión de 1,03 milibares.

Ese hecho permite ajustar el aparato a un número de diferencias de presión mientras se miden las correspondientes tensiones de salida. Para facilitar el movimiento del conjunto diodo-fototransistor, móntese el mismo sobre un pequeño trozo de tarjeta de circuito impreso perforada con un orificio en el centro lo bastante grande para que el tubo del manómetro se deslice por su interior.

Para leer la salida del microbarógrafo de Neher nos valdremos de un voltímetro digital o, mejor, registraremos los datos continuamente empleando un ordenador y un convertidor analógico-digital. Tanto los usuarios del MacIntosh como del PC deberían echar un vistazo a la interfaz Serial Box, que por 99 dólares vende Vernier Software (8565 Southwest Beaverton Highway, Portland, OR 97225; www.vernier.com, 503-297.53.17). Los usuarios de PC podrían considerar un producto similar que vende Radio Shack por cien dólares (número de pieza 11910486). Con cualquiera de los dos nuestro ordenador se transforma en una potente estación de recogida de datos. Armados entonces de nuestro microbarógrafo, detectaremos el tren inacabable de sutiles tsunamis atmosféricos que rueda a nuestro alrededor.

Para más información, consulte la sección Forum de la página Web de la Society for Amateur Scientists en http://web.thesphere.com/SAS/. Puede también escribirse a la Sociedad: 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA92117, o llamar al 619-239.88.07.

Advertencia: Instamos a los lectores que construyan la centrífuga descrita en marzo que no omitan el uso del protector que se describía. Uno de nuestros lectores puso en marcha a gran velocidad su recién construido aparato desprovisto del protector, descubriendo que el rotor estaba lo bastante desequilibrado para saltar en pedazos, lanzando trozos de plástico peligrosamente en todas las direcciones (véase http://web2.thesphere.com/SAS/WebX.cgi).



2. Los circuitos electrónicos de este proyecto pueden construirse con componentes del catálogo de Mouser Electronics

Ian Stewart

¡Qué coincidencia!

Un amigo mío, durante su luna de miel, hace unos años, había acampado en un remoto lugar de Irlanda. Su esposa y él estaban dando un paseo por una playa solitaria cuando, allá a lo lejos, vieron una pareja que se dirigía hacia ellos... que resultó estar formada por el jefe de mi amigo y su amiga.

Las coincidencias resultan fascinantes, pero, ¿tan impresionantes son estos acontecimientos fortuitos? Robert Matthews, periodista y matemático británico cuyos trabajos hemos comentado ya en esta sección, opina que no. En un número reciente de *Teaching Statistics* (primavera de 1998), Matthews, en colaboración con Fiona Stones, examina una de las coincidencias más corrientes: la de las personas que cumplen años el mismo día. Su conclusión es que nos dejamos impresionar demasiado por las coincidencias de cumpleaños, y ello, porque hemos desarrollado muy poca intuición sobre la verosimilitud de los sucesos de este tipo.

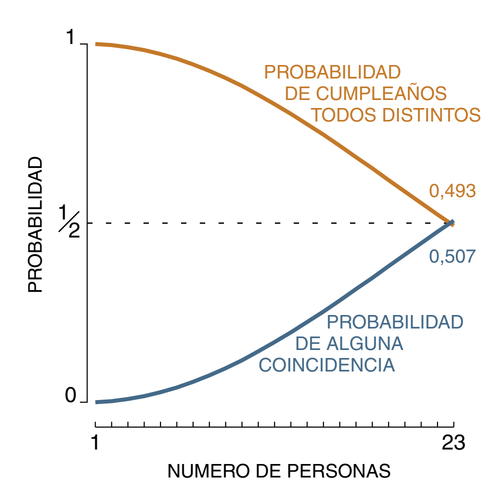
¿Cuántas personas deberían reunirse en una sala para que lo más fácil sea que haya al menos dos con el mismo cumpleaños? Entiendo por "cumpleaños" el mismo día y el mismo mes, aunque no el mismo año. Para no complicar las cosas, prescindamos del 29 de febrero; habrá, pues, 365 cumpleaños diferentes. Supongamos, asimismo, que todas las fechas tienen la misma probabilidad de ser el cumpleaños de una persona, lo que no es del todo correcto, pues en ciertos meses la natalidad es mayor que en otros. Tomar en cuenta estos factores complicaría mucho el análisis, pero las conclusiones no cambiarían gran cosa.

De acuerdo. ¿Cuántas, pues? ¿Cien? ¿Doscientas personas? Cuando los investigadores le plantearon esta pregunta a estudiantes de universidad, la mediana de sus estimaciones fue de 385. Salta a la vista que tal conjetura, aunque popular, es excesiva, pues en cuanto la sala contenga 366 personas (o 367, si contamos también el 29 de febrero), está garantizada al menos una coincidencia. En realidad, el valor correcto es muchísimo menor: solamente 23 personas.

Con frecuencia, en cálculos de este tipo, resulta más sencillo determinar la probabilidad de que *no* se produzca el acontecimiento. Conocido ese valor, para saber la probabilidad de que el suceso *sí* se produzca basta restarlo de 1. Por ejemplo, ¿en qué caso no ocurre el suceso "al menos dos personas tienen el mismo cumpleaños"? Respuesta: cuando todas tengan cumpleaños distintos. Imaginemos que al principio sólo hay en la sala una persona, y que vamos haciendo pasar a otras de una en una. Podemos calcular la probabilidad de que la persona recién llegada tenga distinto cumpleaños del resto de las anteriores. Conforme van entrando en la sala más personas, la probabilidad de que todos sus cumpleaños difieran disminuye regularmente, a la vez que va aumentando la de una coincidencia. Ahora bien, si un suceso tiene mayor probabilidad de darse que de no ocurrir, esta probabilidad será mayor que $^{1}/_{2}$. En cuanto la probabilidad de que todos los cumpleaños difieran sea menor que $^{1}/_{2}$, sabremos que es mayor la probabilidad de una coincidencia —que haya dos personas con el mismo cumpleaños— que lo contrario.

Cuando sólo haya una persona —llamémosla Ana— no cabe la coincidencia, por lo que es seguro que habrá un único cumpleaños, y la probabilidad de que todos los cumpleaños sean distintos es 1. Ahora entra Benito en la sala. Hay 365 cumpleaños posibles, pero Ana ya ha utilizado uno de ellos, por lo que la probabilidad de que sus respectivos cumpleaños difieran es $^{364}/_{365}$. Seguidamente entra Carla. Ahora quedan sólo 363 cumpleaños sin utilizar, por lo que la probabilidad de que el de Carla sea distinto de los otros dos es $^{363}/_{365}$. La probabilidad compuesta de que los tres cumpleaños diverjan es $(^{364}/_{365}) \times (^{363}/_{365})$.

Hipotético partido de fútbol, en el que dos jugadores tienen el mismo cumpleaños. Es probable que en cada partido se dé al menos una coincidencia de cumpleaños entre los 22 jugadores y el árbitro



Lo más probable es que se dé alguna coincidencia en los cumpleaños cuando hay 23 personas

Estamos empezando a observar una regularidad. Cuando Diógenes llega a la sala, la probabilidad de que todos los cumpleaños sean distintos es $(^{364}/_{365}) \times (^{363}/_{365}) \times (^{362}/_{365})$. En general, cuando en la sala se encuentran *n*-personas, la probabilidad de que sus *n* cumpleaños diverjan es $(^{364}/_{365}) \times (^{363}/_{365}) \times \ldots \times (^{(365-n+1)}/_{365})$. Todo cuanto hemos de hacer es ir calculando los sucesivos valores de esta expresión y ver cuándo alcanza un valor menor que $^{1}/_{2}$. La gráfica presenta los resultados. Con 22 personas, la probabilidad de que todos los cumpleaños sean diferentes es 0,524, pero con 23 es de 0,493. Por tanto, cuando entre en la sala la persona número 23, la probabilidad de que al menos dos de los presentes tengan el mismo cumpleaños pasa a ser $1-0{,}493=0{,}507$, es decir, resulta ligeramente más probable que el suceso contrario.

Ponga a prueba la teoría en reuniones o fiestas de más de 23 personas. Proponga apuestas. A la larga, tiene que ganar. En las reuniones numerosas, ganará sin dificultad. La mayoría de los presentes opinará que la coincidencia es inverosímil, porque se fijan en un aspecto del problema que despista un poco: el número de personas de la sala. Aunque 23 personas sean un número pequeño, se pueden emparejar de 253 formas distintas. (El número de emparejamientos de *n* personas es $n \times ^{(n-1)}/_{2}$). Este número es mucho mayor y reviste más interés para la probabilidad de una coincidencia.

Matthews y Stones verificaron la predicción de otra forma. En un partido de fútbol hay 23 personas en el campo: dos equipos de 11 jugadores cada uno, más el árbitro. El pronóstico, por consiguiente, es que en un grupo así resulta más fácil que se dé la coincidencia de dos cumpleaños que el caso contrario. Matthews y Stones investigaron en los partidos de la Primera División del Reino Unido que se jugaron el 19 de abril de 1997. De 10 partidos, hubo coincidencias de cumpleaños en 6.

La probabilidad de que dos personas tomadas al azar entre 23 tengan igual cumpleaños es 0,111; por lo que es de esperar que así ocurra en 1 de cada 9 partidos de fútbol. La probabilidad de que haya tres pares de personas con el mismo cumpleaños es 0,018, mientras que la probabilidad de una triple coincidencia —es decir que 3 de las 23 personas tengan el mismo cumpleaños— es 0,007 y se puede esperar que ocurra en 1 de cada 143 partidos.

Planteemos ahora una cuestión ligeramente diferente. ¿Cuántas personas, además de uno mismo, ha de contener la sala para que lo más probable sea que alguna de ellas tenga el mismo cumpleaños que usted? Se podría pensar que la respuesta es $(^{364}/_{2})+1$, o sea, 183, porque hay 364 cumpleaños distintos del suyo, y si se encuentran en la sala un número de personas mayor que la mitad de ese número, es probable que tenga usted el mismo cumpleaños que alguno de ellos. Pero la respuesta correcta es 253.

Para calcular el número correcto, nos valdremos de la misma técnica que antes: hallar la probabilidad de que los cumpleaños sigan siendo diferentes del suyo, y restar después esa probabilidad de 1. Supongamos que ya se encuentra usted en la sala y que otras personas van entrando una por una —Ana, Benito, Carla, Diógenes, y así sucesivamente. La probabilidad de que el cumpleaños de Ana sea diferente del suyo es $^{364}/_{365}$. La probabilidad de que Benito tenga un cumpleaños diferentes es también $^{364}/_{365}$. Y lo mismo vale para Carla, para Diógenes y para todos los demás. No estamos interesados en las coincidencias correspondientes a otras personas. Supongamos, por ejemplo, que Ana y Carla cumplen años ambas el 19 de mayo. Nada importa; lo único que cuenta es si un cumpleaños es el mismo que el suyo. Así pues, después de que hayan entrado en la sala *n* personas, la probabilidad de que todas tengan cumpleaños distintos del suyo es $(^{364}/_{365})$ elevado a la *n*-ésima potencia. El primer valor de *n* para el que este número es menor que $^{1}/_{2}$ es $n=253$; $(^{364}/_{365})^{253}=0{,}499$.

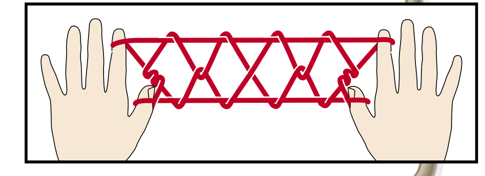
El que la solución del segundo problema sea la misma que el número de emparejamientos del primer problema (253 emparejamientos para 23 personas) no parece tener ninguna trascendencia matemática. Parece ser una coincidencia.

Dado que tendemos a fijarnos en las coincidencias y a despreciar las no coincidencias, les damos a las coincidencias más importancia de la que realmente tienen. El encuentro de mi amigo durante su luna de miel seguramente parezca menos chocante si se piensa en cuántas otras personas tiene que haberse encontrado a lo largo de su vida y que *no* eran ni su jefe ni la esposa de éste.

Acuse de recibo

En el artículo "Un cálculo para la cuna del gato" (febrero de 1998) les pedía a los lectores que ideasen una teoría matemática capaz de explicar algunos aspectos de las figuras formadas por las cuerdas. Mark A. Sherman, editor del *Bulletin of the International String Figure Association*, me envió varios ejemplares de su revista y de su predecesora, *Bulletin of String Figures Association*, que contienen artículos orientados en la dirección correcta. Entre ellos figura el número especial dedicado a los principios matemáticos de las figuras de cuerda (*B.S.F.A.*, 1988), con un capítulo dedicado a los bellos motivos conocidos por diamantes indios (*abajo*) y en un artículo sobre la forma de utilizar figuras de cuerda para enseñar destrezas matemáticas (*B.I.S.F.A.*, 1997)

Confío volver al tema en un artículo futuro. Tal vez, en el ínterin, deseen los lectores ponerse en contacto con la International String Figure Association: members.iquest.net/~webweavers/isfa.htm en la Red —*I.S.*



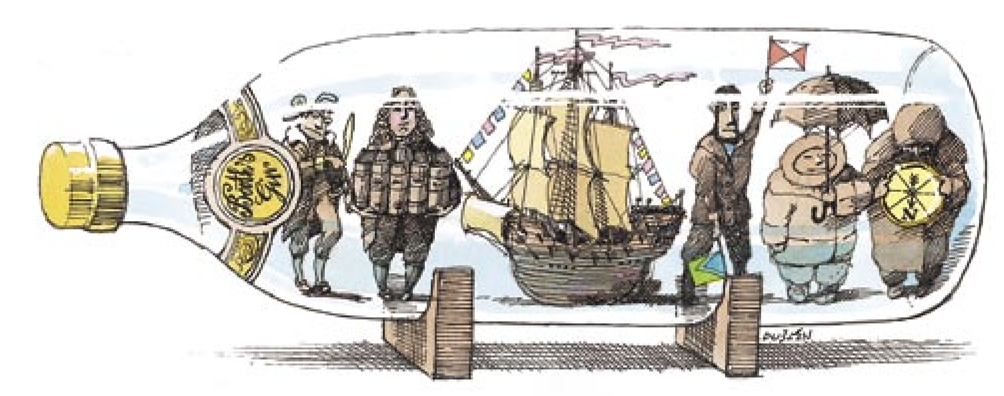
James Burke

Brindis

Cuando la otra noche el camarero abrió mi botella de tónica con gesto ceremonioso, el tintineo metálico me trajo el nombre de William Painter. Este sujeto creó el tapón de la botella de la *Compañía del Sello de la Corona*. (Y de paso desperdició una oportunidad de saltar a la fama cuando aconsejó a uno de sus vendedores, de nombre Gilette, que inventara un artilugio parecido, de usar y tirar, la maquinilla de afeitar de seguridad.)

En cualquier caso, tras varios intentos infructuosos de cierre eficaz —con cera, bolas de cristal y una combinación de alambre y corcho—, Jacob Schweppes popularizó las bebidas efervescentes con tapón de metal, durante la Exposición en el Palacio de Cristal de Londres en 1851.

Vendió enormes cantidades de refrescos e hizo realidad el olvidado sueño de Joseph Priestley, quien décadas antes había inventado la gaseosa. La incorporación del gas al agua (se decía que curaba la fiebre amarilla) fue uno de sus aportaciones de mayor éxito a la química industrial, fruto, todas ellas, de la educación avanzada que había recibido en una de las famosas academias de los Disidentes. A finales del siglo XVII, tras el fracaso de la Confederación Puritana auspiciada por Oliver Cromwell, se impidió el acceso a la universidad, al parlamento y al ejército, así como predicar o comerciar en las ciudades principales, a todo aquel que no hubiera firmado el juramento de fidelidad al trono. De esta forma, los protestantes ingleses que no aceptaron el retorno de la monarquía fundaron sus propias escuelas. Hubieron de labrarse su progreso.



El plan de estudios de estas academias de los Disidentes rezumaba la influencia de Amos Komensky. Este teólogo, librepensador y pedagogo, originario de Bohemia, arribó a Inglaterra en 1641 y causó tal impresión entre los puritanos con sus dos libros sobre pedagogía —*The Great Didactic* y *The School of Infancy*—, que se vio abrumado por ofertas de trabajo. Rehusó, entre otras, la presidencia de un obscuro colegio universitario de Nueva Inglaterra, llamado Harvard. Komensky prefirió concentrarse en el desarrollo de una filosofía de la realidad, que fundaba en pequeños elementos irreducibles. Se dice que tal idea inspiró a un monstruo de la matemática, Gottfried Leibniz, en la concepción de entidades fundamentales que denominó mónadas. El alemán intervino en la invención del cálculo que se necesita para medir cosas infinitesimalmente pequeñas (aunque, para un inglés, Newton se bastara solo y fuera, además, el primero).

Leibniz también tenía otra pasión, y aún mayor, las bibliotecas. Su trabajo como contable del Elector de Hannover no era más que una sinecura para que pudiera dedicarse a escribir la historia de la familia ducal (tarea que no llegó a terminar). Mientras buscaba libros en París, Leibniz se vio atraído por un volumen que explicaba cómo crear una biblioteca personal, con instrucciones sobre catalogación, selección de títulos, limpieza de los volúmenes o trato con el personal de la biblioteca. Gabriel Naudé compuso en 1627 esta delicia para ratas de biblioteca y, siguiendo sus propios consejos, organizó la gigantesca biblioteca de cuarenta mil volúmenes del cardenal Mazarin, primer ministro de Francia, quien levantó un edificio donde instalarla para su posterior disfrute público. El libro de Naudé no pasó inadvertido años más tarde para un aristócrata y erudito inglés, un tal John Evelyn, quien dio con él durante un viaje por Europa. Con el tiempo, Evelyn tradujo el libro y le entregó una copia a un amigo, que la utilizó para ordenar el material que había recopilado con la intención de redactar la historia de la Marina inglesa (su criterio de selección se basaba en el tamaño y no en el contenido, salvo en lo tocante a los libros de erotismo).

A este bibliófilo al por mayor de nombre Samuel Pepys debemos que, a finales del XVII, se dispusiera de algo escrito sobre navegación. Como secretario del almirantazgo, persiguió la supremacía británica en el mar, mediante la implantación de artillería regular, programas periódicos de construcción de naves, tablas de sueldos y ascensos, códigos disciplinarios y una leva de capitanes que estuvieran en condiciones de diferenciar la popa y la proa. Pepys tuvo un señalado fracaso, precisamente la transmisión de señales, poco desarrollado por aquel entonces. Las limitaciones sobre lo que se podía comunicar con un sistema de nueve banderolas en un día de calma quedan ilustradas en el dato siguiente: si el almirante deseaba invitar al capitán de otra nave a su almuerzo, se aprovechaba la brisa para ondear el mantel en el buque insignia.

Hacia 1794 la situación había mejorado. Mas, para el gobierno británico la Marina no recibía los mensajes con suficiente rapidez, en especial entre Londres y la capitanía general de Portsmouth. Ese año, se descubrió a un prisionero de guerra francés con una copia de las instrucciones de un novedoso sistema de comunicación mediante semáforos, que acababa de inventar el francés Claude Chappe y utilizaba Napoleón, enemigo encarnizado de Inglaterra. De inmediato, el reverendo John Gamble, el mismo pastor castrense que había proporcionado la información, propuso ciertas mejoras. Su semáforo consistía en un bastidor de madera con cinco contraventanas que se abrían y cerraban según un código establecido y cuyas señales se podían descifrar a distancia con ayuda de un telescopio. Con una cadena de estaciones de retransmisión las señales podían llegar de Portsmouth a Londres en escasos minutos. Por desgracia, otro clérigo, que además era el cuarto hijo de un conde, propuso un perfeccionamiento mucho menos atinado. La idea de Gamble fue desechada y él se volvió a dedicar a la compra de patentes extranjeras. Una de ellas resultó ser para un proceso francés de conservación de alimentos en latas.

En 1818 se realizó un nuevo intento de búsqueda del paso del Noroeste en las regiones polares del Canadá. La expedición se hizo a la mar con una provisión de comida enlatada (y cuarenta paraguas para obsequiar a los esquimales). No alcanzó su propósito, pero avivó el interés de uno de los tripulantes, James Clark Ross, cuyo tío capitaneaba la expedición. En 1829 encabezó la suya propia, armada para encontrar el polo magnético terrestre. La mañana del 1 de junio de 1831, Ross colgó una aguja magnética de un fino hilo de nailon de Nueva Zelanda. Un ángulo de inclinación de la aguja de 89’ 39’’ estaba lo bastante cerca de la vertical como para convencerle de que el polo se encontraba bajo sus pies. La posición —70º 3’ 17’’ N 96º 46’ 43’’ W— fue marcada con un montículo de piedras, se hincó la bandera y el polo magnético se reclamó para Gran Bretaña y su rey Guillermo IV. (Ross ignoraba que tan pronto como había terminado de hablar, el errante punto magnético ya había empezado a desplazarse hacia otra parte.)

Es uso de exploradores dar nombre a los lugares que les cautivan. Ross hizo lo propio con lugares desolados como la península de Boothia y Puerto Félix. No hace falta ser un lince para sospechar que hubo un Félix Booth. De no ser por las veinte mil libras que Booth generosamente regaló, tal vez el viaje de Ross no se hubiera llevado a cabo, que el polo magnético no hubiera sido temporalmente magnético y que yo no hubiera podido acabar esta vez como de costumbre: de vuelta al principio.

¿Recuerdan el bar de que les hablaba? El camarero no sólo puso tónica en mi vaso y eso mismo fue lo que le permitió a Booth hacerse rico y financiar excursiones polares: la ginebra.

Ornitología

Contra el método

LA CLASE AVES. UN RECORRIDO BIOLÓGICO POR LA TAXONOMÍA, por Francisco Bernis. Editorial Complutense; Madrid, 1997.

Obra de autor, ése es el calificativo que mejor se ajusta a las características del libro. Francisco Bernis, profesor emérito de la Universidad Complutense, frisando los ochenta años, presenta una obra documentada sobre la taxonomía de aves. En su larga docencia, ha sido testigo de la evolución de las técnicas anatómicas a las moleculares.

Las nuevas técnicas, que permiten reexaminar viejos problemas morfológicos y anatómicos, han dado una visión de modernidad y quizá de excesiva fama, en opinión del autor, a los biólogos moleculares. Con ello se ha relegado al olvido a los que sentaron las bases de la ornitología y establecieron su sistemática. Bernis critica ese olvido histórico y reclama el mérito de los ornitólogos clásicos, sin dejar de reconocer la aportación de los jóvenes.

El ensayo está organizado en cuatro capítulos de unas 30 páginas de extensión cada uno, un epílogo y dos apéndices con las clasificaciones de la clase aves según Wetmore y la de los paseriformes según Mayr y Amadon.

En el primer capítulo se detallan hechos y conceptos básicos (individuos, especies, hibridación, polimorfismo, etc.) En el segundo, el desenvolvimiento de las taxonomías (repaso sobre los principales personajes e hitos históricos). Se ocupa el tercero de los impactos del progreso biológico (mendelismo, cladismo denominado ahí cladistia, taxonomía numérica, así como otras disciplinas o técnicas utilizadas en la taxonomía de aves como el análisis de las proteínas, en especial del huevo, la morfología, el comportamiento, la parasitología o la paleontología). Por fin, el ADN, donde explica generalidades sobre la técnica de hibridación, su utilidad para la cronometría y el reloj molecular.

El libro se deja leer con gusto por la facilidad de pluma del autor. Es útil como recopilación de materiales algunos antiguos de difícil obtención (por ejemplo la puesta al día sobre las aves fósiles, donde se citan diversos ejemplos españoles), estructurados de manera personal y por el esfuerzo didáctico de presentar de forma amena temas tan tediosos como la anatomía o la metodología de las técnicas moleculares.

El epílogo hace un análisis crítico de su visión de la ciencia y de la manera como se lleva a cabo su estudio hoy en día. Como buen veterano, previene de la ingenua creencia o superstición de método en los investigadores (metodologitis lo llama él). En suma, en el fondo invita a ejercitar menos la fe en los métodos y más el pensamiento crítico, para no llegar a confundir "algoritmo con realidad, es decir, la cifra, el índice o el estadístico, con el ser o el proceso donde se aplicaron".

XAVIER FERRER PARAREDA

Informática

Para médicos

HANDBOOK OF MEDICAL INFORMATICS. Dirigido por J. H. van Bemmel y M. A. Musen. Springer; Heidelberg, 1997.

Esta obra recoge la experiencia de una selección de autores expertos en el dominio de la informática médica. En sus 620 páginas expone con una cuidada madurez una síntesis de los conceptos actuales desarrollados en un campo muy activo.

Se abre con una definición de la informática médica en cuanto ciencia, sus objetivos y sus métodos. El contenido médico de este capítulo se extiende y da coherencia al resto de la obra. Y pese a ser resultado de la aportación de varios autores no pierde homogeneidad.

El libro se estructura en tres grandes bloques. El primero, sobre los datos, comprende tres secciones: la transformación de los datos en información, el procesado y almacenamiento de los datos en los ordenadores y la adquisición de los datos a partir de los pacientes. Nos exponen las bases de la teoría de la información y del funcionamiento de los ordenadores. Incluyen ejemplos típicamente médicos que ayudan a comprender la relación entre las bases teóricas y el ejercicio de la medicina.

El segundo bloque describe los sistemas de información, servicios o aplicaciones que se han ido desarrollando, articulados a su vez en tres secciones: los sistemas de información centrados en el paciente, los que se ocupan del conocimiento y de la toma de decisiones y los que están destinados a la organización sanitaria (prestar apoyo a los hospitales u otras instituciones). Concede a la historia clínica el papel de elemento integrador de las aportaciones de cada especialidad, sin olvidar la informática aplicada a la enfermería.

El tercer bloque abarca los aspectos metodológicos de la informática médica, distribuidos en tres secciones: la metodología para el procesado de la información, la que corresponde al desarrollo y estructura de los sistemas de información y las particularidades de la informática médica como profesión o disciplina académica. Sobresale aquí el alto grado de integración del texto con la sociedad. La aportación de los académicos, de la industria o de las organizaciones de estandardización de los temas clave de la informática médica se exponen para que el lector se haga una idea cabal de su situación actual.

A lo largo de sus treinta y siete capítulos el libro va desgranando los logros de la informática médica, desde el tratamiento de las señales biológicas hasta la gestión de los proyectos informáticos. Completa la vocación pedagógica del libro su exposición en dos asientos de Internet. A partir de ellos puede mantenerse un contacto interactivo con la obra.

Para resumir puede decirse que se trata de una obra única, por su contenido conceptual, su amplio espectro temático, el alto valor pedagógico y la cuidada maduración que ha alcanzado, adecuada para todo lector que desee obtener una idea de lo que es la informática médica y su alcance.

P. FERRER SALVANS

Electrón

Hilo de Ariadna

J. J. Thomson and the Discovery of the Electron, por E. A. Davis e I. J. Falconer. Taylor and Francis; Londres, 1997. **Electron. A Centenary Volume**. Dirigido por Michael Springford. Cambridge University Press; Cambridge, 1997. **Master of Modern Physics: The *Scientific* Contributions of H. A Kramers**, por D. ter Haar. Princeton University Press; Princeton, 1998.

The Story of Spin, por Sin-itiro Tomonaga. University of Chicago Press; Chicago, 1997. **Wolfgang Pauli, wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.A. Band 4, 1950-1952**. Edición preparada por Karl von Meyen. Springer; Heidelberg, 1996. **Paul Dirac: The Man and his Work**. Dirigido por Peter Goddard. Cambridge University Press; Cambridge, 1998.

Selected Scientific Papers of Sir Rudolf Peierls. Edición preparada por R. H. Dalitz y Sir Rudolf Peierls. World Scientific Publishing-Imperial College Press; Singapore, 1997. **Zur Frühgeschichte des Elektronenmikroskops**, por Lin Qing. Verlag für Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik; Stuttgart, 1995.

El descubrimiento del electrón en 1897 abrió, se dice, la caja de Pandora. Esa partícula establece la escala básica de energía y tamaño. La investigación sobre su naturaleza y propiedades, con la aplicación de los resultados obtenidos, ha marcado el rumbo de la ciencia y la técnica contemporáneas. Por eso, con otra metáfora clásica, se le puede llamar el hilo de Ariadna. En pocos años, el descubrimiento de Joseph John Thomson —la existencia de un "corpúsculo", libre y componente común de toda la materia— inspiró nuevas teorías sobre átomos y moléculas, cuyo alcance se extendía del mundo microscópico al cosmos. Pero no sólo la física y la química dilataron su horizonte. Con la invención de la válvula termoiónica, el transistor, el circuito integrado y el ordenador, se operó la más arrolladora de las revoluciones técnicas de todos los tiempos. Por mor de esa partícula, la microscopía de transmisión, de barrido, de efecto túnel, la resonancia electrónica de espín, la fotoemisión y los haces de electrones de altas energías se hallan en el centro de la ciencia de finales del siglo xx.

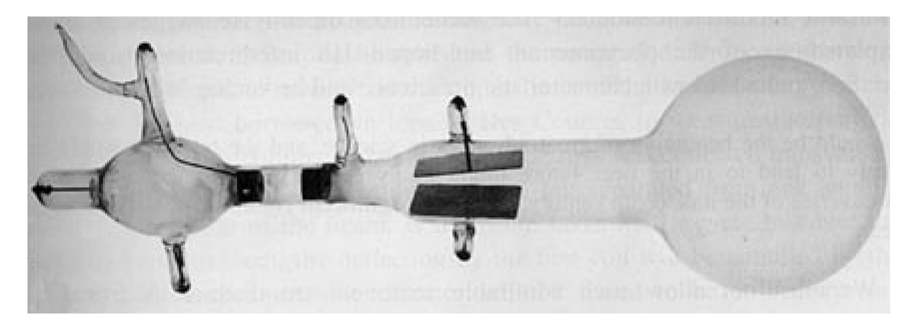
A Thomson y su gesta están dedicados *J. J. Thomson and the Discovery of the Electron* y *Electron. A Centenary Volume*. Su figura da cima a la física clásica, cuyas limitaciones pone de manifiesto H. A. Kramers, *Master of Modern Physics*. Tiende éste un puente hasta la teoría cuántica del espín del electrón, obra maestra de Pauli y de Dirac. Peierls, discípulo y ayudante de Pauli, apuntó hacia las posibles aplicaciones, ninguna mejor que la microscopía electrónica de Ernst Ruska y cuantos se recuerdan en *Zur Frühgeschichte des Elektronenmikroskops*.

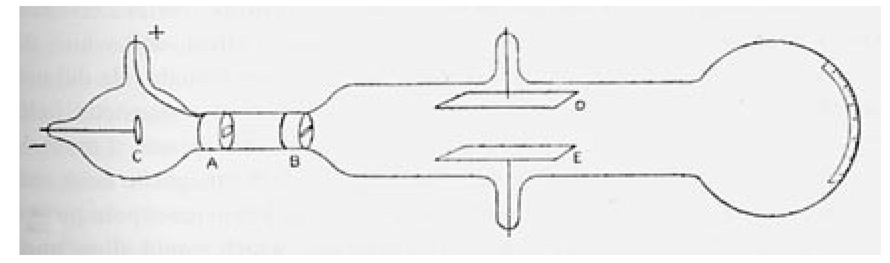
Thomson inició su formación en el Colegio Owens. Tuvo allí tres maestros sobresalientes. Thomas Barker le enseñó los fundamentos de la matemática. Balfour Stewart le introdujo en la física del éter. De Osborne Reynolds aprendió la explicación vorticial de los fenómenos. Además, se entusiasmó con el *Tratado de electricidad y magnetismo* de Maxwell que glosaba Arthur Schuster. Antes de abandonar Owens, se estrenaba en los *Proceedings of the Royal Society* con un artículo "Sobre electricidad por contacto de aislantes".

Con sólida preparación en dinámica analítica y electrodinámica maxwelliana, recibida en el Trinity, abordó la transformación de la energía. Empezó estudiando el movimiento de las cargas eléctricas. En "Sobre efectos eléctricos y magnéticos producidos por el movimiento de cuerpos sometidos a una corriente eléctrica", publicado en el *Philosophical Magazine* en 1881, consideró el ejemplo de una esfera cargada que avanza en línea recta y demostró que la alteración del campo eléctrico entorno engendraba un campo magnético, con la aportación consiguiente de energía al medio.

En 1883 gana el premio Adams por su trabajo sobre la acción mutua entre dos vórtices en un fluido perfecto e incompresible. Un año después sucede a Lord Rayleigh en la cátedra de física experimental del Cavendish, tras recusarla Kelvin. Con plena autonomía para escoger su línea de trabajo, se centró en el fenómeno de la descarga eléctrica. De acuerdo con su teoría vorticial de la descarga, Thomson creía que los enlaces químicos que mantienen unidos los átomos estaban mediados por el éter. Cualquier causa, un campo eléctrico por ejemplo, que turbara el éter podría disociar la molécula en sus átomos componentes.

En 1893 dio a la imprenta *Notes on Recent Researches in Electricity and Magnetism*, libro que pretendía coronar el mencionado tratado de Maxwell, cuya segunda edición acababa Thomson de revisar. En esos años consideraba sinónimos los cambios operados en electricidad y en química. Hacia 1895 había ahondado en la relación entre cargas y átomos, al par que esbozado una nueva teoría de su interacción. La energía de un átomo cargado con una unidad de electricidad positiva, lucubraba, no era la misma que con carga de signo contrario. Unos átomos (oxígeno y cloro, por ejemplo) muestran preferencia por adquirir carga negativa, mientras que otros (así el hidrógeno) la prefieren positiva.





Tubo empleado en la deflexión eléctrica y magnética de los rayos catódicos



Hendrik A. Kramers (1894-1952)



Wolfgang Pauli

El descubrimiento por W.C. Röntgen de los rayos X vino a complicar la entonces controvertida naturaleza de los rayos catódicos. Los experimentos realizados por Thomson en 1897 que condujeron al descubrimiento del electrón acabaron con la disputa.

Para él los rayos catódicos eran *corpúsculos*, dotados de carga negativa y entidades últimas e indivisibles. Portaban la unidad básica de carga, $e = -1{,}6 \times 10^{-19}$ C, y eran miles de veces más ligeros que el átomo. (Midió, además, la razón de masa a carga de la partícula de los rayos catódicos: m/e.) Los rayos se curvaban en una trayectoria casi circular de acuerdo con lo esperable para una partícula con carga negativa. Le llamó la atención la persistencia de la deflexión, la misma cualquiera que fuera el gas en el tubo de descarga o el material de los electrodos. Puso de manifiesto que las partículas emitidas de las superficies de los metales, en los efectos fotoeléctrico y termoeléctrico, presentaban la misma razón de masa a carga que la partícula de rayos catódicos. El hallazgo del electrón ayudó a establecer la existencia de átomos, pero éstos perdían su carácter simplicísimo. ¿En qué consistían los indivisibles, las partículas elementales? ¿Qué teoría podía explicar su comportamiento?

El mundo submicroscópico que emergía instó la aparición de una nueva física, la primera teoría cuántica, que en un cuarto de siglo quedaría envejecida. Para representar ese tránsito, menos convulso de lo que pudiera suponerse, nadie mejor que Hendrik Kramers (1894-1952), cuya muerte llorarían con pareja amargura Bohr, padre de la vieja cuántica, y Pauli, estructurador de la nueva.

El desarrollo de la vieja teoría cuántica coincide con la estancia de Kramers en Copenhague con Bohr; en fechas, desde 1916 hasta 1926. Durante esos años, Copenhague fue uno de los centros principales de la física teórica —si no *el* centro— con Kramers convertido en "alter ego" de Bohr. A ese intervalo pertenece lo mejor de su producción.

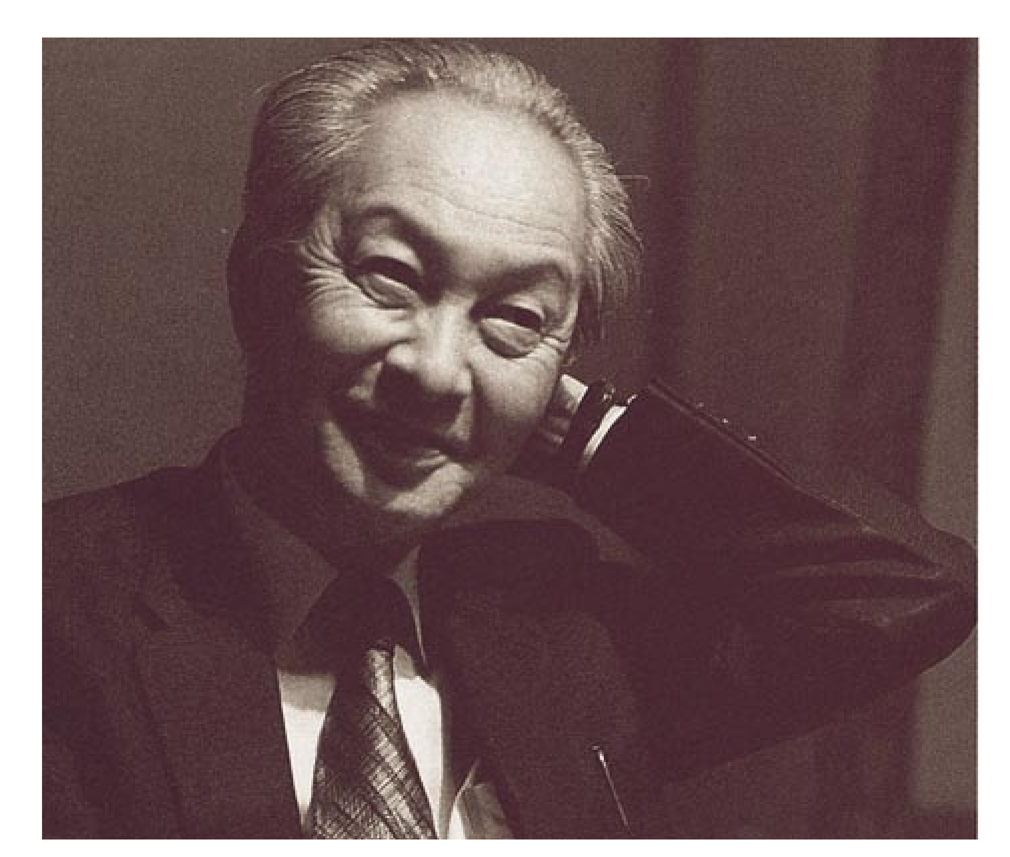
Bohr introdujo por entonces el principio de correspondencia, en virtud del cual la mecánica cuántica trascendía la teoría clásica. Y Einstein publicó su artículo sobre la absorción y la emisión espontánea e inducida de radiación. (Los coeficientes de Einstein, de eso se trataba, dependen del estado inicial y final del átomo en la transición productora de la emisión, en tanto que en la perspectiva clásica la dependencia era sólo del estado inicial.)

De acuerdo con la vieja teoría cuántica, los sistemas atómicos se fundaban en estados estacionarios, en los que no habría emisión de radiación; esa sólo ocurriría cuando el sistema operara una transición desde un estado estacionario a otro a una frecuencia n dada por la diferencia de energías en los dos estados dividida por la constante de Planck.

En la vieja teoría cuántica se anticipaban los niveles de energía de algunos átomos. Pero no se había domeñado todavía la cuestión de las polarizaciones y las intensidades de las diversas líneas espectrales. A eso dedicó su tesis doctoral Kramers, un trabajo que trasluce su profundo dominio de la mecánica clásica, de la teoría atómica de Bohr y de la matemática. La tesis consta de dos partes. La primera, un ejercicio de mecánica clásica y una brillante aplicación de la teoría de Hamilton-Jacobi, analiza la teoría general de sistemas condicionalmente periódicos; muestra la forma en que pueden expresarse las coordenadas que describen las órbitas clásicas como series de Fourier, y aplica luego esa teoría al átomo de hidrógeno. En la segunda parte introduce la teoría cuántica y



(1900-1958)



Sin-itiro Tomonaga (1906-1979)

esboza lo que puede deducirse sobre la polarización y la intensidad de las líneas espectrales emitidas por un sistema atómico si se conocen sus estados estacionarios.

La vieja teoría cuántica se mostró eficaz mientras se limitó a sistemas de un solo electrón. Bohr pergeñó incluso una explicación cualitativa de la estructura estratiforme de los átomos, que justificaba la ubicación de los elementos en la tabla periódica. Mas, en cuanto se buscó una explicación cuantitativa, surgieron las dificultades. El más sencillo de los sistemas de varios electrones es el átomo de helio. Muchos se quemaron las cejas interpretando su espectro, pero no resultaba fácil hallar el sistema adecuado de coordenadas. En 1923 Kramers señalaba que, tras el fracaso del común de los modelos —los dos electrones se movían en el mismo plano—, había que optar por un modelo en que los dos electrones se movieron en planos que se cortaran. El ángulo se escoge de suerte tal que el momento angular total del átomo sea igual a h. Tras un minucioso examen del problema cuántico implicado, llega a la conclusión de que la mecánica clásica no sirve ya para explicar sistemas de muchos electrones.

La rotación del electrón sobre su eje, es decir, su espín, tuvo una larga historia, a la que no son ajenos ni la multiplicidad de términos espectrales ni el efecto Zeeman anómalo. El modelo original de átomo, el de Bohr-Sommerfeld, especificaba que el término espectral del átomo de hidrógeno podía indicarse por el número cuántico principal n, el número cuántico subordinado k y el número cuántico magnético m. (Bohr usó el n. Sommerfeld introdujo k y m.) El n y el k tomaban valores enteros 1, 2, 3..., y $n \geq k$. El tamaño de la órbita del electrón estaba determinado por n; la forma, por k. Sommerfeld introdujo el cuarto número cuántico j en 1920; le llamó número cuántico interno.

En 1924 Wolfgang Pauli lanzó la idea de que el origen de la multiplicidad espectral no era el núcleo, sino el electrón. Esa noción fue semilla del concepto de espín, avanzado por Uhlenbeck y Goudsmit en 1925. Una vez que un electrón penetra en un estado especificado por n, k, j y m, ese electrón evita que otros electrones entren en el mismo estado cuántico; es el llamado principio de exclusión de Pauli.

No sólo emergieron, en el bienio de 1925-26, el principio de exclusión, el espín del electrón o la teoría de Thomas, sino que se produjo la reforma radical de la teoría cuántica con el descubrimiento de la mecánica de matrices de Heisenberg y el desarrollo de la mecánica ondulatoria de Schrödinger. En un comienzo, ambas diferían en su formalismo matemático y en su interpretación física. Pronto, sin embargo, se vio su equivalencia matemática. Dirac se encargó de unificar ambas teorías mediante el vector de estado y su majestuosa teoría de la transformación de la mecánica cuántica (véase *Paul Dirac*: *the man and his work*). En la teoría unificada, las magnitudes físicas, que se expresan mediante una matriz en mecánica matricial y mediante un operador lineal en mecánica ondulatoria, se representan mediante operadores lineales abstractos (los números q de Dirac). Vía la transformación de los sistemas de coordenadas ortogonales en el espacio lineal podemos derivar la mecánica ondulatoria a partir de la matricial, y al revés. Dirac llegó a su ecuación, que describe una partícula relativista de espín 1/2, movido por razones de belleza matemática, que, en sus manos, se convertía en una poderosa herramienta heurística de leyes físicas.

Heisenberg aplicó la mecánica matricial al modelo de espín en 1926. Un año más tarde, Pauli recurrió a la transformación de Dirac y se propuso incorporar el espín en la representación de Schrödinger. Descubrimiento de capital importancia en mecánica cuántica era el de la relación entre la estadística de una partícula y la simetría de su función de onda. Hay partículas que obedecen la estadística de Bose (bosones) y partículas que siguen la estadística de Fermi (fermiones). En torno a 1927, sólo se sabía con claridad que el fotón y el electrón pertenecían a tales grupos; el primero era representativo de los bosones y el electrón de los fermiones. Afirmar que un fermión obedece la estadística de Fermi equivale a decir que obedece el principio de exclusión de Pauli.

Con la aportación de Pauli y Schrödinger, los electrones añadidos en átomos ocupaban capas de creciente energía. Se determinaban así las propiedades químicas de los elementos. Pero este grado de comprensión requería dos ingredientes ulteriores, introducidos *ad hoc*: el electrón porta un espín intrínseco fraccionario y dos estados de espín, y en segundo lugar el electrón obedece la estadística de Fermi-Dirac. Pauli presenta la primera formulación mecánico-cuántica del espín usando matrices 2×2 fundadas todavía en hipótesis *ad hoc*. Luego, Dirac, en un golpe de genio (que Pauli llamó acrobático), deriva la ecuación relativista que resulta ser la teoría definitiva del espín del electrón.

Si Weinberg ha sabido contar en un lenguaje diáfano la protohistoria del mundo submicroscópico, *The Story of Spin* de Sin-itiro Tomonaga sacará de más de un apuro a los alumnos explicándoles *a nativitate* el concepto de espín y su estadística asociada. (Pauli publicó en 1940 su teoría de la relación entre espín y estadística de las partículas elementales. En ella infería que las únicas partículas con valores de espín enteros son los bosones y las únicas con espín semientero, los fermiones.)

La dificultad del espín la reconocía el mismo Feynman: "parece ser uno de los pocos lugares de la física donde existe una regla que se establece con suma sencillez, mas para la que no se ha encontrado una explicación lisa y llana. La explicación yace escondida en las profundidades de la mecánica cuántica relativista. Esto significa probablemente que no acabamos de entender del todo el principio fundamental implicado". De su alcance, valga la anécdota protagonizada por Murray Gell-Mann y Dirac. Tras una conferencia sobre los quarks dada por el primero, se le acercó Dirac y le confesó su aceptación de tales componentes últimos. "Maravilloso", replicó Gell-Mann. "¿Puedo preguntarle la razón?". "Porque tienen espín", repuso Dirac.

Tomonaga muestra, sirviéndose del procedimiento estándar en teoría de relatividad especial, que para la ecuación de Klein-Gordon la energía posee un solo valor mientras que la carga admite dos, en tanto que para la ecuación de Dirac la situación es la inversa. Manifiesta luego, siguiendo a Pauli, que estos resultados se obtienen de las propiedades generales del álgebra de tensores si se requiere que las magnitudes físicas sean covariantes. Por último, señala que los campos bosónicos y fermiónicos deben estar cuantizados a través de las relaciones de conmutación y anticonmutación, respectivamente. Por tanto, sus estadísticas se obtienen a partir de las exigencias de la relatividad y de la covarianza de las magnitudes físicas.



Rudolf Ernst Peierls y Yevghenia Nikolayevna Kanegisser, recién casados, en 1931

Pauli no abandonó nunca un tema que, por otro lado, seguía conociéndose cada vez mejor. Como leemos en *Wolfgang Pauli, wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. Band 4*, propone inaugurar el Instituto de Física de Lund en 1951 con una conferencia: *Sobre la conexión entre espín y estadística*. "No conozco nada mejor y sobre el asunto tengo no sólo viejas historias que contar, sino aclarar también puntos recientes sobre el tema propuestos por Feynman y Schwinger." Vale la pena leer ese epistolario variopinto donde se barajan cartas de notable interés científico (a Heisenberg, a Dyson —renormalización de la electrodinámica cuántica—, a Peierls), con otras de carácter personal (a Oppenheimer, a Bohr) y lucubraciones inesperadas (acerca de la psicología de Jung). Se muestra cauto ante las incursiones del neopositivismo lógico en la interpretación de la mecánica cuántica (correspondencia con Strauss). Deja patentes sus filias, particularistas, y sus fobias, ondularistas (*nominatim* Schrödinger y Bohm).

Ayudante de Pauli en Zurich fue Rudolf Ernst Peierls, cuyas ideas extendió a la emergente física del estado sólido, aunque muchas no cristalizaron por falta de técnicas experimentales. Peierls había estudiado en Munich con Sommerfeld, quien le despertó el interés por los electrones de los metales. Se traslada a Leipzig con Heisenberg, para estudiar la "teoría del hueco" a fin de explicar el efecto Hall negativo observado en un metal que tiene la banda de conducción casi llena. En Zurich, con Pauli, elabora la primera teoría de bandas para los electrones de un metal. En la primavera de 1933 se traslada a Cambridge. Ante el rumbo de los acontecimientos en Alemania, se queda en Inglaterra.

Peierls comienza a estudiar en pleno desarrollo de la teoría cuántica, en 1928. Sin embargo, las aplicaciones de ésta apenas si habían comenzado. Se entregó al estudio de la teoría de los sólidos y analizó el movimiento de los electrones en su seno, concentrándose en el efecto de los campos magnéticos. En 1929 explicaba la conducción del calor en no metales, prediciendo un crecimiento exponencial de su conductividad térmica a bajas temperaturas, lo que se verificó en 1951. Su trabajo en física nuclear se remonta a 1933, cuando James Chadwick le retó a él y a Hans Bethe a explicar sus primeras mediciones de la sección eficaz de la fotodesintegración del deuterón. Tras la guerra se centró en física nuclear, aunque algunos de sus discí-

pulos continuaron con las cuestiones fundamentales de física de la materia condensada. Y se dedicó con ahínco a la fundamentación de la teoría del diamagnetismo en los metales.

Los artículos recogidos en esta compilación de *Selected Scientific Papers* jalonan su trayectoria. Así, sus aportaciones de 1934, con Hans Bethe, sobre la hipótesis del neutrino. Empezada la segunda guerra mundial, Peierls y Frisch estudiaron la fisión del uranio y la emisión de neutrones que le acompaña con liberación de energía. En un informe decisivo, mostraron que podía desencadenarse una reacción en cadena en una masa pequeña de uranio enriquecido, produciendo una bomba atómica. El gobierno británico lo tomó en consideración y Peierls encabezó un grupo teórico que desarrolló formas de separar isótopos de uranio y calcular el rendimiento de la reacción en cadena. El equipo se trasladó a EE.UU. dentro del proyecto Manhattan.

Con todo, la aplicación técnica de resultados más fecundos gira en torno al microscopio electrónico, cuyos primeros años se recogen en *Zur Frühgeschichte des Elektronenmikroskops*. En la misma línea que el telescopio, el microscopio óptico y el espectroscopio, útiles que cambiaron el rumbo de la ciencia, no existe un acuerdo general sobre su inventor. El premio Nobel de 1986, dedicado al ingenio, recayó en el único superviviente de los implicados: Ernst August Friedrich Ruska, que lo compartió con Binnig y Rohrer.

Habían fallecido, en efecto, Hans Busch y Max Knoll. El primero había hecho una larga carrera en electricidad y óptica geométrica de electrones, base obligada para el desarrollo de la microscopía; halló que un carrete magnético podía enfocar un haz de electrones, a la manera en que una lente convexa podía enfocar una haz de luz. Por su parte, Knoll tenía experiencia en rayos catódicos. Desde 1927 se enroló en el laboratorio de investigación de electrones de Adolf Matthias. Ruska, el más joven, estudió métodos de alto voltaje y vacío en Munich y Berlín, sustrato imprescindible para el trabajo en óptica electrónica. En 1928 Knoll y Ruska construyeron un microscopio de 17 aumentos empleando métodos de óptica electrónica. Cinco años más tarde Ruska había construido un instrumento que proporcionaba 12.000 aumentos. En 1938 aparecieron ya los modelos comerciales.

LUIS ALONSO

Frege

Actualizado

FREGE: IMPORTANCE AND LEGACY. Dirigido por Matthias Schirn. Walter de Gruyter; Berlín, 1996.

El matemático Frege (1848-1925) se vio llevado de la matemática a la lógica en su intento de aclarar la noción de número de manera radicalmente segura. Intento de una fundamentación de la aritmética que le condujo a la creación de una conceptografía, que no es otra cosa que la lógica matemática o formal, apoyada en una previa crítica del lenguaje ordinario. Frege considera que la forma gramatical sujeto-predicado es impotente para manifestar el contenido de pensamiento puro de la aritmética. Pensamiento que se plasma de manera más adecuada en la forma función-argumento o, con terminología posterior, concepto-objeto. Esta forma le permite introducir la cuantificación universal y existencial. Cuantificación que obliga a un enfoque extensional de los conceptos o conjuntos a los que pertenecen los argumentos u objetos. Su enfoque extensional lleva implícito el compromiso ontológico de un realismo "platónico" respecto a los objetos matemáticos.

Muy en esquema las palabras anteriores indican que Frege, creador de la lógica formal, tiene que adentrarse en la filosofía de la matemática, epistemología, filosofía del lenguaje, ontología, etc., terrenos en los que realiza contribuciones originales no exentas de críticas, de errores. El fallo más conocido, la aparición de antinomias o paradojas en el edificio formal construido para fundamentar la matemática. Paradoja a la que no tenía más remedio que llegar, como le ocurrió a Cantor, a Russell. Estaba contenida en el enfoque extensional adoptado para manejar las clases o conjuntos.

Desde los años sesenta se ha ido produciendo una "vuelta a Frege", en la que no faltan congresos internacionales, entre los que hay que mencionar el celebrado en Munich en julio de 1991, base de los trabajos reunidos por Matthias Schirn en este volumen.

La obra se divide en una introducción del editor y tres partes: lógica y filosofía de las matemáticas con 10 ensayos; epistemología, con 3; filosofía del lenguaje, con 3. De los 16 trabajos nueve derivan del congreso de 1991 y siete han sido escritos o adaptados para este volumen.

Tait contrapone la posición de Frege a las de Dedekind y Cantor sobre el concepto de número. Adopta la posición fregeana en Fundamentos (1884) y Leyes de la Aritmética (1893 y 1903, donde realiza una crítica de sus contemporáneos. Tait descubre el sesgo de la crítica fregeana.

Los trabajos de Heck, de Boolos y la réplica de Dummett, el de Simons, ponen de relieve dónde se encuentra la paradoja en el sistema fregeano y cómo manejando las leyes de la aritmética puede superarse la misma; cuestión sobre la que ya había llamado la atención hace años Thiel quien analiza, aquí, la estructura del sistema lógico de Frege. Por su lado von Kutschera adapta el estilo derivativo Frege-Hilbert al de la deducción natural que se origina con Gentzen en los treinta.

Frente al realismo ontológico hay otras tendencias como la formalista o la nominalista. Y una crítica, dura crítica, del nominalismo representado fundamentalmente por Field, se contiene en el ensayo de Hale y Wright. En paralelo, Resnik defiende una versión del estructuralismo que trata de contrastar con las restantes posiciones, en especial la fregeana.

En la parte dedicada a la epistemología, Ricardi aborda lo que se ha considerado clave en el pensamiento logicista de Frege, su antipsicologismo, mientras que Gabriel estudia lo que considera epistemología disfrazada y Burge discute el problema de cómo alcanzar el conocimiento de los objetos lógicos que, por existentes, han de existir en un tercer mundo.

Los temas de filosofía del lenguaje vienen representados por el estudio que realiza Parsons sobre las teorías de la verdad y el significado, Mendelsohn sobre el tratamiento de la referencia indirecta, mientras que Hale adelanta un primer trabajo sobre los términos singulares.

Schirn resume el papel que la geometría desempeñó en el pensamiento de Frege y cómo desde la sensación de fracaso en su intento de fundamentar la aritmética en la lógica, Frege volvió a la geometría como posible campo de fundamentación.

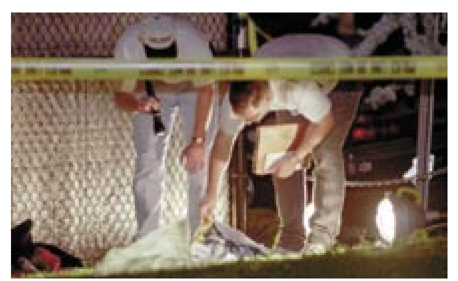
Los autores no se limitan a parafrasear a Frege, sino a pensar a partir de, y en ocasiones contra, Frege. Lo cual hace que este volumen sea enriquecedor tanto para conocer más profundamente la obra fregeana como su legado.

JAVIER DE LORENZO

IDEAS APLICADAS

Elizabeth A. Dragon

Reacción en cadena de la polimerasa

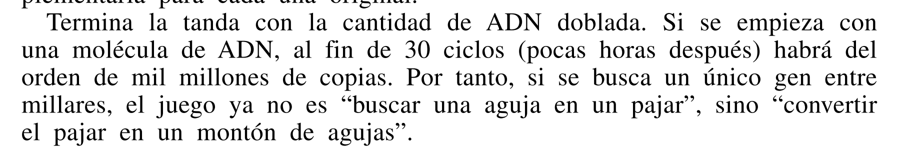


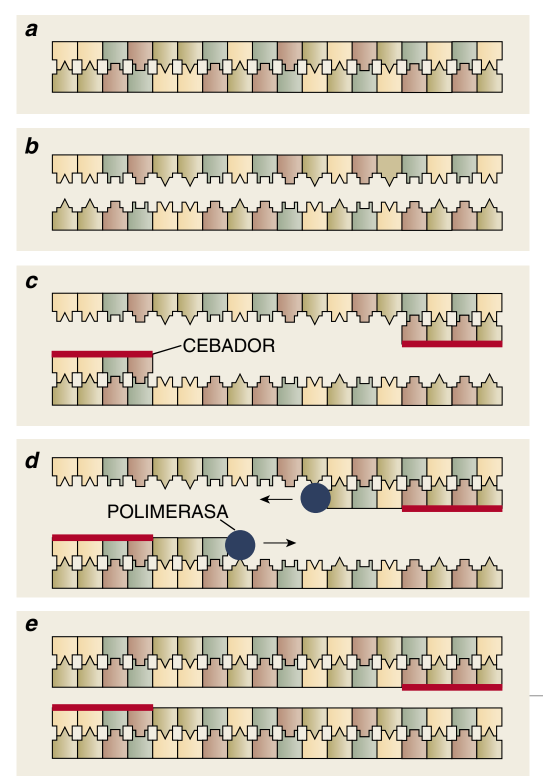

PISTAS EN LA ESCENA DEL CRIMEN: un simple cabello o una gota de sangre pueden analizarse mediante la RCP.

La reacción en cadena de la polimerasa (RCP) es una técnica que imita al modo en que la naturaleza replica el ADN. Descrita en 1985, la RCP se ha convertido en la herramienta inseparable del investigador por su capacidad de duplicar una muestra minúscula de material hereditario. La RCP se ha empleado para analizar ADN prehistórico, para diagnosticar enfermedades y para facilitar las identificaciones en las investigaciones policiales.

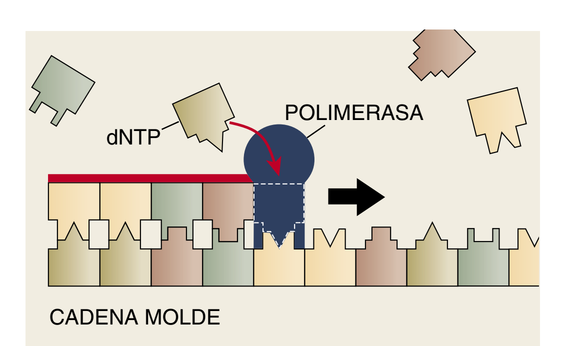
El ADN se presenta en forma de molécula de doble hebra, en hélice, en la que una cadena complementa la otra. La RCP empieza con la muestra de ADN, que se introduce en un tubo de reacción junto con los cebadores (segmentos cortos sintéticos de ADN unicatenario que encajan perfectamente con los bordes del ADN a multiplicar), trifosfatos desoxinucleotídicos (dNTP, los ladrillos del ADN), tampones y una enzima termorresistente (la polimerasa). Al calentar la mezcla, las cadenas "molde" del ADN se separan. Seguidamente, a distintas temperaturas, el resto de los componentes de la mezcla se organizan espontáneamente, construyendo una nueva cadena complementaria para cada una original.

Termina la tanda con la cantidad de ADN doblada. Si se empieza con una molécula de ADN, al fin de 30 ciclos (pocas horas después) habrá del orden de mil millones de copias. Por tanto, si se busca un único gen entre millares, el juego ya no es "buscar una aguja en un pajar", sino "convertir el pajar en un montón de agujas".





LA DUPLICACION DEL ADN empieza con la mutiplicación (copia) de un corto segmento de ADN bicatenario (*a*). En una solución calentada a 95 ºC, los puentes de hidrógeno entre cadenas se rompen; se dejan dos cadenas sueltas (*b*). Cuando la mezcla se enfría hasta los 50 o 65 grados C, unos cebadores de ADN especialmente preparados se adhieren a cada cadena en puntos que flanquean la región a copiar (*c*). A 72 ºC, las enzimas polimerasa extienden los cebadores ligados en un sentido, empleando por molde el ADN original (*d*). Los productos son dos nuevas cadenas dobles de ADN, ambas idénticos al original (*e*). Esta reacción cíclica dura sólo minutos, o menos, y puede repetirse indefinidamente.



LA ENZIMA POLIMERASA extiende un cebador ligado. Del medio circundante, extrae un trifosfato desoxinucleotídico (dNTP) libre que complemente la siguiente posición sin emparejar de la cadena molde de ADN. A continuación, la enzima une el dNTP al extremo del cebador y se traslada a la posición siguiente.

EL CRECIMIENTO EXPONENCIAL del ADN deseado se debe a que los productos de cada ciclo hacen de plantilla para el ciclo siguiente.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



REPLANTEAMIENTO DE LOS CUASARES, por Michael Disney

Las observaciones recientes acometidas con el Telescopio Espacial Hubble podrían llevarnos hasta la naturaleza y el origen de los cuásares, los misteriosos generadores de energía del cosmos.

ACUICULTURA Y ENTORNO, por Claude E. Boyd y Jason W. Clay

Un asesor de los productores de peneidos y un conservacionista presentan una receta para criar camarones de forma responsable.

UNIFICACION Y DUALIDAD EN TEORIA DE CUERDAS, por Luis E. Ibáñez Santiago

Las teorías de cuerdas son las más firmes candidatas para lograr una descripción unificada de todas las interacciones fundamentales de la naturaleza.

COMPUTACION CUANTICA CON MOLECULAS, por Neil Gershenfeld e Isaac L. Chuang

Apoyados en la resonancia magnética nuclear, los expertos ahorman las moléculas en determinados líquidos para convertirlas en un computador extraordinario.

GRADIOMETRIA DE GRAVEDAD, por Robin E. Bell

Una técnica de navegación, antes secreta, que empleaban los submarinos con misiles balísticos les vale ahora a los geólogos para buscar recursos naturales ocultos en el subsuelo.

NEUROBIOLOGIA DE LA DEPRESION, por Charles B. Nemeroff

En los últimos tiempos se ha intensificado la búsqueda de las bases biológicas de la depresión. Los datos recientes ofrecen la posibilidad de nuevos enfoques en el tratamiento de esta enfermedad que frecuentemente tiene consecuencias letales.

EL ALCOHOL EN EL MUNDO OCCIDENTAL, por Bert L. Vallee

El papel representado por el alcohol en la civilización occidental ha sufrido un cambio drástico a lo largo del último milenio. Tras la actual interpretación médica del alcohol como principal agente de enfermedades yace una compleja historia.

DESFIBRILACION, por Mickey S. Eisenberg

En los 50 años transcurridos desde que los médicos utilizaron por primera vez la electricidad para poner de nuevo en marcha el corazón humano, hemos aprendido mucho sobre los desfibriladores y poco sobre la fibrilación.

